

Grado en Ingeniería Mecánica
Curso académico 2018-2019

Trabajo Fin de Grado

“Propuesta de tecnología apropiada para el calentamiento de agua en el sector residencial en Cuba”

Javier Arranz Albero

Tutor/es:

Ulpiano Ruiz-Rivas Hernando

Reinéis Montero Laurencio

Yoalbys Retirado Mediaceja

Madrid, 21 de Febrero de 2019

ÍNDICE:

índice de figuras	3
Capítulo I: introducción	5
CAPÍTULO II: Consumo energético para el calentamiento de agua en el sector residencial: particularidades en Cuba	8
2.1 Tecnologías apropiadas para el calentamiento de agua.....	8
2.2 Estructura del consumo energético del sector residencial en Cuba	10
2.3 Políticas energéticas en relación al uso de las fuentes renovables de energía en el sector residencial	13
2.4 Tecnologías renovables en el contexto residencial en Cuba: particularidades de los calentadores solares.	16
2.4.1 Calentadores solares de tubos al vacío.....	18
2.4.2 Calentadores de placa plana.....	20
2.4.3 Calentadores compactos	21
2.5 Aspectos técnicos y socioeconómicos relacionados con el consumo de agua caliente sanitaria.....	23
Capítulo III: diseño de la instalación	27
3.1 Aspectos iniciales	27
3.1.1 Condiciones locales.	27
3.1.2 Localización y orientación.....	28
3.1.3 Elección de la tecnología y materiales.	33
3.2 Diseño y montaje de la instalación.	37
3.2 Análisis técnicos previos.....	40
capítulo iv: Análisis de resultados	49
4.1 Puesta en marcha de la instalación	49
4.2 Resultados experimentales	50
4.3 Análisis de resultados.	52
4.4 Marco regulador.....	58
Capítulo V: CONCLUSIONES.....	59
Bibliografía	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Prototipo de calentador con botellas de plástico y su instalación. [1].....	9
Figura 2: Calentador solar de manguera. [2]	10
Figura 3: Consumo portadores primarios. [3].....	11
Figura 4: Portadores primarios de producción de electricidad en 2016	11
Figura 5: Gráfico del consumo en el sector residencial-	12
Figura 6: Tarifa eléctrica por tramos.[10]	14
Figura 7: Proyección de la matriz de producción de electricidad para el año 2030 [11].	15
Figura 8: Radiación diaria de Cuba. [15]	16
Figura 9: Ejemplo efecto termosifón con captador de tubos al vacío.[13]	18
Figura 10: Ejemplo de un sistema de tubos al vacío con termosifón.[16]	19
Figura 11:Ejemplo real, colector y tanque termo sifónico de tubos al vacío.[17].....	19
Figura 12: Modelo de calentador solar de placa plana.[13]	20
Figura 13: Corte trasversal del recipiente del calentador solar compacto.[16]	22
Figura 14: Calentador solar compacto fabricado en Cuba.[18]	22
Figura 15: Recipiente captador acumulador[16]	22
Figura 16: Grafica de la demanda de consumo de ACS en el sector residencial de Cuba.	25
Figura 17: Hornilla (izquierda) y tirabuzón eléctrico (derecha).[19]	25
Figura 18: Consumo electricidad del tirabuzón eléctrico para diferentes volúmenes,para una temperatura de 37 ^º C.[19]	26
Figura 19: Ejemplo barril aceite industrial.[22].	27
Figura 20: Irradiación en función de la inclinación y temperatura a lo largo del año	30
Figura 21: Irradiación en función de la orientación a lo largo de un día.....	31
Figura 22: comparativa de la Irradiación del plano horizontal con la inclinación y orientación escogida a lo largo del año	32
Figura 23: comparativa de la Irradiancia del plano horizontal con la inclinación y orientación escogida a lo largo del día	32
Figura 24: Influencia del diámetro de tubería en los calentadores compactos.	35
Figura 25: Render del diseño 3D	37
Figura 26: Dimensiones principales de la caja aislante del colector	37
Figura 27: Esquema de la instalación final.....	38
Figura 28: Instalación real en Cuba.	39
Figura 29: Termómetros analogicos usados.	39
Figura 30 : Erro cometido en las iteraciones.	44
Figura 31. Resultados primera simulacion, modelo con aislante termico.	45
Figura 32 Rendimiento y calor util de la primera simulacion con aislnte termico.	46
Figura 33 Resultados de la simulacion correspondientes al diseño instalado.	47
Figura 34: Calor util y rendimiento de la simulacion correspondientes al diseño instalado	48
Figura 35. Temperatura del colector sin demanda de agua ni cubierta.	51
Figura 36: Temperatura del colector recogida en los ensayo, con demanda.	52
Figura 37: Condiciones climaticas del 5 de diciembre.	53
Figura 38: Evolucion de la temperatura, calor util y la representacion del calor obtenido el 5 de diembre.....	54

Figura 39: Rendimiento y temperatura del colector para el 5 de diembre.....	55
Figura 40: Imagen termográfica de la instalación al medio día solar el 5 de diciembre.	56
Figura 41: Comparativa de los datos obtenidos experintalmente y los calculados por el modelo teorico bajo para el 5 de diciembre.	57

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Este proyecto se desarrolla en el contexto cubano gracias a una beca de cooperación internacional de la Universidad Carlos III de Madrid, por tanto, presenta ciertas características especiales al llevarse a cabo en Moa, provincia de Holguín (Cuba). Además, la obtención de esta beca es el resultado del concurso realizado por la universidad entre numerosos proyectos, siendo este el mejor valorado.

Este proyecto de cooperación cuenta con una estancia de 4 meses en Moa, en la universidad minero metalurgia de Moa (ISMM), acogido por el (CETAM) centro de estudio de energía y tecnología avanzada de Moa, asistiendo como un investigador más siguiendo las mismas rutinas diarias.

En este proyecto se realizará un conjunto de tareas a favor del desarrollo de la energía solar térmica (calentadores solares), donde se implementará y fabrica una variante de tecnología apropiada para el calentamiento de agua, siempre enfocado para el sector residencial. Además, de disponer de un plan de trabajo muy detallado, en el cual se desarrollaron las siguientes tareas:

- Análisis del contexto energético de Cuba orientada a las tecnologías utilizadas para el calentamiento de agua.
- Revisión de las políticas energéticas en base al tema de las energías renovables, enmarcadas en las posibilidades del uso de las mismas para el calentamiento de agua, dirigidas al sector residencial.
- Gestión personal de varios dispositivos utilizados en la implementación del prototipo. Traslados internos dentro de la provincia para recopilar materiales.
- Estimación de las curvas de demanda de agua caliente de las viviendas residenciales como base de la demanda a considerar para el diseño de experimentos.
- Realización de experimentos para conformar la base de datos y el posterior análisis de eficiencia. Para comprobar y ajustar posteriormente el modelo que describe el funcionamiento del dispositivo, en base al prototipo fabricado.
- Se encontraron dificultades durante el trabajo como la gestión de recursos y la automatización de la recolección de los datos que finalmente se pudo realizar de forma parcial.

- Como parte de la evaluación de los resultados parciales del proyecto, se presentó un trabajo en el Taller de Energía ENERMOA 2018, desarrollado en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM).
- Se participó en dos entrenamientos organizados por el CEETAM mediante el proyecto ERASMUS + Capacity Building for Renewable Energy Planning in Cuban Higher Education Institutions (CRECE). Los cursos estuvieron relacionados con modelos de planificación energética, cambio climático y mercados energéticos.

El documento se organiza en cuatro capítulos, donde se recogen las principales fases de desarrollo de la fabricación del prototipo de tecnología apropiada.

En el segundo capítulo se expone la situación energética y económica actual del país, así como una revisión de la tecnología actual disponible según las diferentes alternativas comerciales en el corto medio plazo y su difícil implantación en el sector residencial, debidos a los grandes costes y los problemas de disponibilidad de unidades. Además de una primera concepción del diseño del prototipo.

En el tercer capítulo se desarrolla la base técnica que sustentara el diseño, incluyendo las variables características que influyen en la modelización matemática realizada del prototipo, así como los materiales disponibles y sus costes, que determinarán la fase de diseño.

El cuarto capítulo consta de la concepción del modelo de experimentación a seguir, incluyéndose las herramientas utilizadas para la medición. Posteriormente se realiza el análisis de los resultados experimentales, así como la validación del modelo teórico llevado a cabo en el anterior capítulo. También incluye la amortización en años que supondría la implementación, además del posible marco regulador que ampara al prototipo.

Por último, se desarrollan las conclusiones que aporta todo el documento.

El objetivo principal del proyecto será el estudio de la posible implementación de un calentador solar de agua en el sector residencial y con ello el análisis de todos los posibles factores que condicionan esta implementación, ya sean socioeconómicos como ambientales. Por lo tanto, la misión del proyecto es la de intentar satisfacer una necesidad

no atendida aún, el calentamiento de agua en el sector residencial. Es por este motivo por el que se llevará a cabo la fabricación de un prototipo. Además, al tratarse de una beca de colaboración, otro objetivo derivado de esto es el intercambio de conocimiento, formas de vida y enriquecimiento personal.

CAPÍTULO II: CONSUMO ENERGÉTICO PARA EL CALENTAMIENTO DE AGUA EN EL SECTOR RESIDENCIAL: PARTICULARIDADES EN CUBA

En este capítulo se evalúa el mix energético cubano, así como los hábitos de consumo de la población. Concretamente el consumo de agua caliente sanitaria (ACS) en el sector residencial evaluando los problemas existentes para cubrir esta necesidad creciente. Se analizan también las tecnologías existentes y sus variantes renovables.

Se caracteriza el uso y la tecnología asociada al calentamiento de agua en el contexto cubano de recursos alternativos y convencionales.

Por último, se analizan los problemas y beneficios desde un punto de vista técnico, social y económico para así entender y poder proponer soluciones apropiadas. Entendiendo además el concepto de tecnología apropiada.

2.1 Tecnologías apropiadas para el calentamiento de agua.

La tecnología apropiada es aquella que busca una solución manteniendo una especial atención a los factores medioambientales, éticos, culturales y socioeconómicos de la comunidad a la que va dirigida esta tecnología. Este especial interés da como resultado que la implementación tenga resultados positivos en un periodo de tiempo aceptable, sin llegar a la implementación forzosa de determinada tecnología importada, que no tiene que ser la adecuada en esa comunidad.

En dicha comunidad, que es la de Cuba, concretamente la zona oriental (Moa, Holguín), calentar agua puede resultar una tarea muy sencilla y más con la alta radiación disponible de un clima tropical. Solo bastaría exponerla al sol unas horas para conseguir elevar la temperatura del agua, ya que los usos habituales en este sector residencial requieren una temperatura de 35-40 C° fácilmente alcanzables con unas pocas horas de exposición solar.

Sin tener que recurrir a costosos modelos comerciales de importación, ya que, al tratarse Cuba de un lugar sin demasiados recursos económicos ni materiales, así como pocas libertades para determinadas importaciones, se estudia la posibilidad de una tecnología apropiada para el calentamiento de agua. También se busca cubrir esta necesidad con los medios materiales y humanos que pueden encontrarse en la zona, teniendo en cuenta en todo momento la disponibilidad y los costes totales.

Con el objetivo principal de llegar a al mayor público posible y así conseguir una alta implementación por parte de la población, ya sea por fabricación propia o en pequeños talleres locales, para cubrir la demanda del municipio.

En la actualidad, se realizan diferentes prototipos de calentadores solares no comerciales, obteniendo unos rendimientos que nunca llegan al que puede dar uno comercial, pero que son capaces de cubrir las necesidades a partir de los recursos disponibles en el entorno.

Algunos ejemplos son los que se pueden ver en las *Figura 1* y *Figura 2*, que van desde una simple manguera negra enrollada en forma de caracol en un tablero de madera expuesto al sol, a sistemas más sofisticados, como puede ser un captador plano mediante tuberías de PVC negro y botellas de plástico transparente. Estas tuberías están recubiertas para reducir las pérdidas por convección unido a un tanque de almacenamiento, funcionando mediante termosifón.

Incluso la simple cámara de un neumático de camión o coche grande expuesta al sol y con la inclinación adecuada nos puede servir para elevar la temperatura lo suficiente para satisfacer la pequeña demanda de un hogar con un clima tropical.

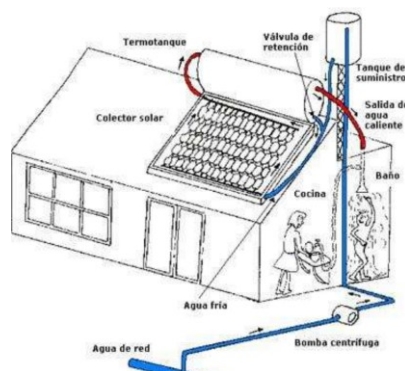


Figura 1: Prototipo de calentador con botellas de plástico y su instalación. [1]

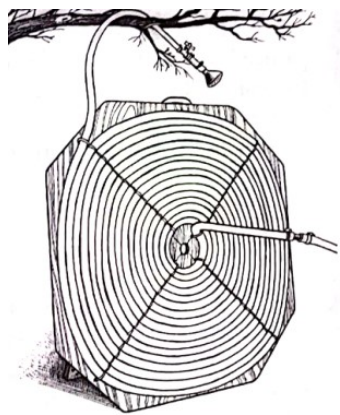


Figura 2: Calentador solar de manguera. [2]

Los ejemplos anteriores hacen constancia de lo que se puede llegar a realizar aprovechando los recursos que ofrece el entorno con materiales sencillos o desechos. De este modo, se consiguen cubrir las necesidades de una comunidad empobrecida en cuanto a medios y recursos.

Para que hoy en día sea viable la utilización de calentadores solares en Cuba, deben ser de tecnología sencilla, capaces de producirse en la zona de implantación y con materiales que no requieran importación debido a la situación del país.

2.2 Estructura del consumo energético del sector residencial en Cuba

La base energética del país está caracterizada por la alta dependencia del petróleo, como se puede ver en la *Figura 3*. Gran parte de este petróleo es importado, representando aproximadamente un 53 % del total actualmente.

Desde el año 2000 se produce una mayor parte de crudo en el país realizando un aprovechamiento de los gases derivados, sobre todo para el aprovechamiento en el sector residencial con el objetivo de sustituir los viejos equipos ineficientes de cocina y calentamiento de agua, ya que se trata de grandes consumidores de electricidad.

De todo el petróleo consumido, un 45% va destinado a la producción de electricidad, puesto que Cuba no dispone de ningún sistema alternativo predominante para la producción de electricidad, sino que se basa en viejas centrales termoeléctricas que funcionan con fuel oil.

Como resultado, el petróleo es la energía primaria predominante con diferencia al juntar su uso para la producción de electricidad y transporte dentro del país, produciendo grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂) y gases contaminantes como el azufre (S). Esto es debido a la gran cantidad de azufre presente en el petróleo de producción cubana.

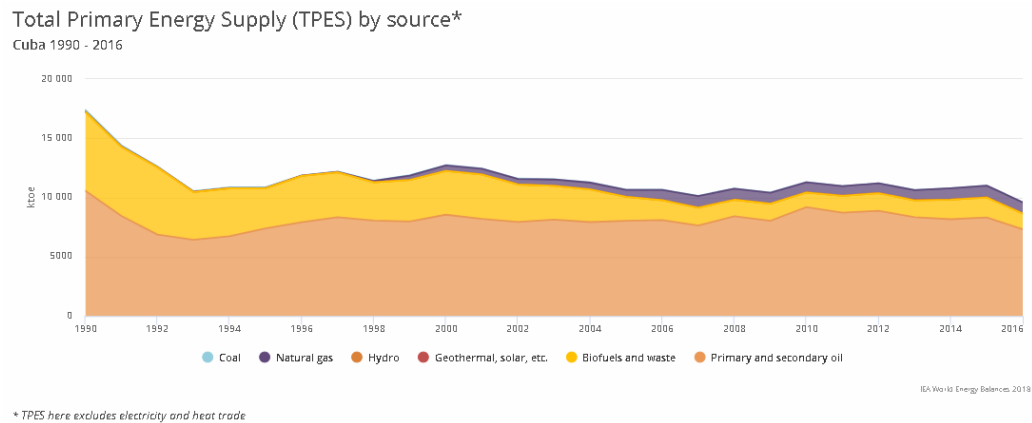


Figura 3: Consumo portadores primarios. [3]

Un caso particular de los servicios de energía lo constituye la energía eléctrica, ya que en el caso de Cuba, su producción depende mayoritariamente de combustibles fósiles como se puede ver en la Figura 4.[3]

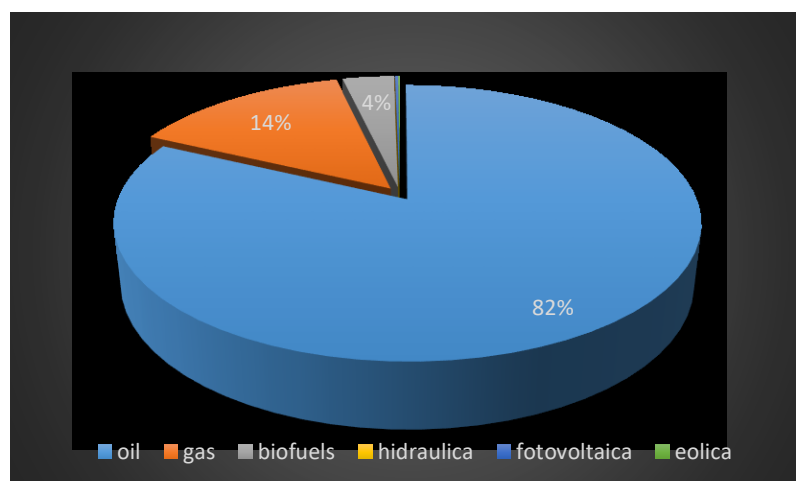


Figura 4: Portadores primarios de producción de electricidad en 2016

En el caso particular de este sector residencial, se destina el 43% de la electricidad total producida, siendo este dato el menor de los últimos años, ya que desde

la última mitad de la década de los 90 la dependencia de la electricidad ha disminuido debido a la implementación del gas licuado de petróleo por parte del gobierno.

A pesar de ello, como podemos ver en el *Figura 5*, la electricidad sigue siendo el portador predominante en el sector residencial, por el gran uso de hornillas y calentadores de agua eléctricos de muy baja eficiencia.[4]

De hecho, una cantidad considerable de la electricidad producida en el país, es consumida directamente en las viviendas (más de 60% en algunas provincias), principalmente en la cocción de alimentos y el calentamiento de agua.[5]

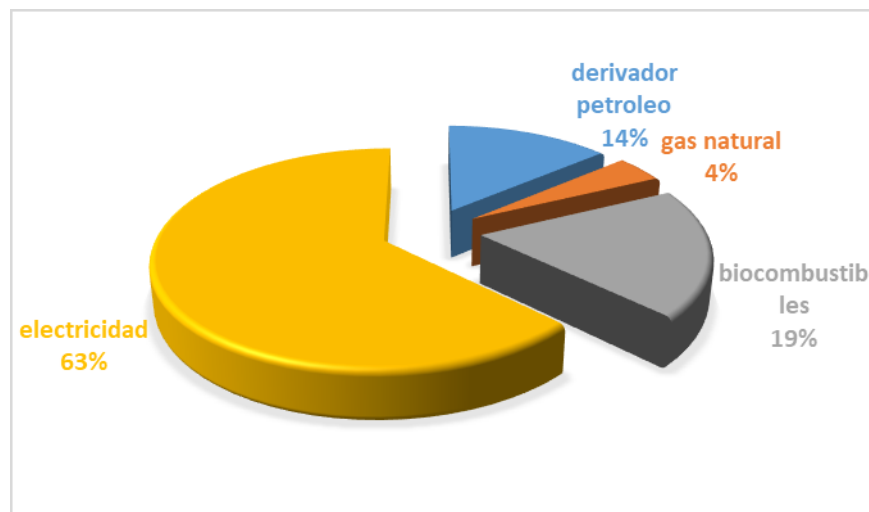


Figura 5: Gráfico del consumo en el sector residencial-

El uso final de la electricidad en el sector residencial se aproxima por métodos estadísticos ya realizados en el pasado, donde podemos comprobar que el calentamiento de agua es responsable de un gran consumo en torno al 14% de la energía eléctrica en el sector residencial.[1]

Aun siendo Cuba un país cálido, en los meses que descienden las temperaturas, la población acostumbra a calentar el agua. Según Luís Bériz, presidente de Cuba Solar, el 80% de la población cubana calienta agua para bañarse durante todo el año. Por lo que para abastecer este consumo se está destinando la generación que produce una planta termoeléctrica típica del territorio cubano de potencia 400 MW.[6]

Según una encuesta realizada en 2007, de 12171 personas encuestadas, el 89% calienta el agua para bañarse y el 92% de ellos lo hace todo el año.[7]

Por todo ello, los problemas fundamentales de la energía en Cuba asociada al sector residencial se deben a diversos factores, como pueden ser:

- La alta dependencia de los combustibles importados para la generación.
- Alto coste promedio de la energía entregada al consumidor final.
- Equipos ineficientes en la zona, sobre todo en el calentamiento de agua y cocción de alimentos.
- Desinformación del pueblo de buenos hábitos de consumo.

2.3 Políticas energéticas en relación al uso de las fuentes renovables de energía en el sector residencial

Desde el año 2004 se agudizó la crisis energética en Cuba, debido a que la generación base del país se realizaba con termoeléctricas ineficientes con 25 años de explotación y sólo un 60 % de disponibilidad con frecuentes averías. Se comenzó a deteriorar el estado del sistema eléctrico generando una gran cantidad de apagones producto de la baja disponibilidad de la generación. Este fue el inicio de la revolución energética cubana.[4]

La Revolución Energética se desarrolla en cinco programas de actuación. En primer lugar, se llevó adelante el programa de uso racional de la energía, con el objetivo de lograr ahorro y uso eficiente. En segundo término, se implementó el programa de transformaciones del sistema eléctrico nacional, que provocó el incremento de la disponibilidad del servicio eléctrico. Se inició entonces el programa para incrementar el uso de las energías renovables junto con el programa de aumento de la explotación y producción de petróleo y gas.[8]

Entre las medidas aplicadas cabe destacar la renovación de equipos ineficientes en el programa de eficiencia energética en el sector residencial. Esto supuso un cambio de 9,4 millones de bombillas incandescentes (100 %) por lámparas fluorescentes y se sustituyeron 4,4 millones de electrodomésticos ineficientes (2,6 millones de neveras, 230 mil aires acondicionados, 1,0 millón ventiladores, 247 mil televisores y 260 mil bombas hidráulicas). Todo ello, redujo el pico de potencia eléctrica aproximadamente un 11 %.[9]

La tarifa eléctrica también sufrió cambios, como se puede ver en la *Figura 6*, incentivando el ahorro. Se estructuró en diferentes niveles en función del consumo para pagar el KWh por tramos. A mayor consumo mayor coste por KWh.

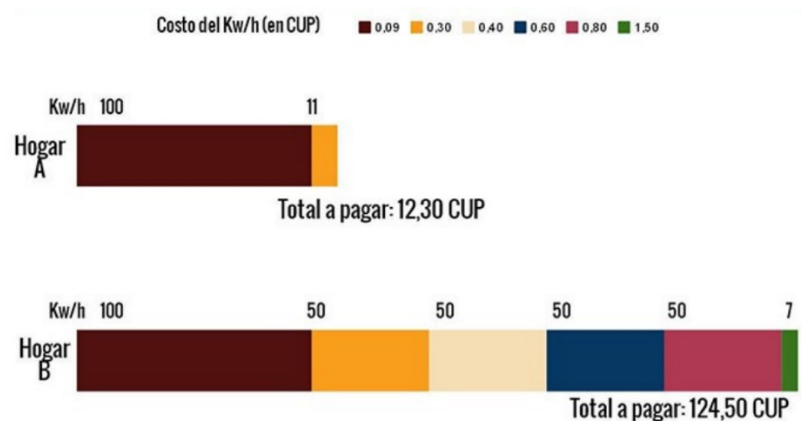


Figura 6: Tarifa eléctrica por tramos.[10]

Se propone así, para 2030, siguiendo los objetivos de desarrollo sostenible, lograr que las energías renovables sean parte indispensable de la producción eléctrica del país, como se puede ver en la *Figura 7*. Para ello se aprueba el decreto ley 345, donde se marcan las líneas a seguir para cumplir dicho objetivo propuesto, de forma detallada y minuciosa, así como los deberes de todos los actores implicados para lograr dicho objetivo, recogiendo nueve planes de acción a seguir:[4]

1. Proyectos de Sistemas de Gestión de la Energía
2. Proyectos de Evaluación Energética en Edificios
3. Reglamentos para el establecimiento de estándares mínimos de eficiencia energética en equipos de uso final de la energía.
4. Proyectos de Evaluación Energética en los sistemas tecnológicos
5. Proyectos de evaluación energética para las inversiones
6. Proyectos de ventas de Calentadores Solares y SSFV al sector residencial
7. Proyectos de Evaluación y Sustitución de Tecnologías en el Sector residencial y privado.
8. Proyectos para la mejora de los sistemas de la generación y uso del vapor
9. Revisión de potencialidades para la cogeneración.

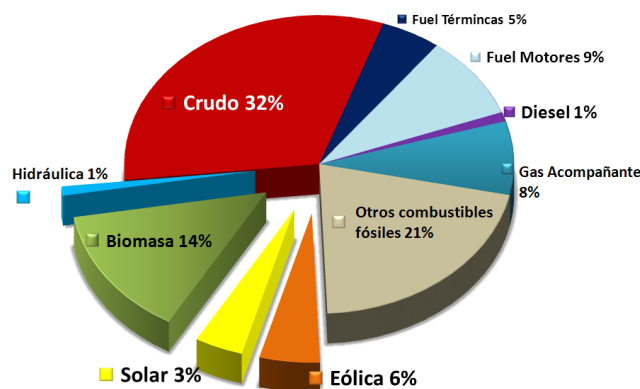


Figura 7: Proyección de la matriz de producción de electricidad para el año 2030 [11].

En el sector residencial se encuentra uno de los grandes potenciales de ahorro, valorando la inversión necesaria por parte del estado. Como se ha visto, este sector es un gran consumidor de electricidad y gran parte de la misma se destina a la cocina y al calentamiento de agua, donde existen grandes márgenes de mejora gracias a las energías renovables de fácil implantación en Cuba. Esto es debido principalmente al clima tropical del país.

Ese margen de mejora se puede dar en la producción de agua caliente, ya que es el sector residencial un gran consumidor de ACS.

Según ONURE, el 2 % de la energía total del país es destina al calentamiento de agua, siendo este un consumo de 195,4 tonelada equivalente de petróleo (tep) por mes, de las cuales sólo están cubiertas por energías renovables 7,5 tep.[9, 12]

Además, según ISES (International solar Energy Society), el consumo de agua caliente sanitaria en los países en desarrollo supone entre el 30 y el 40% de la energía de un hogar medio En cambio, en los países desarrollados, este porcentaje es de un 26% del consumo total.[13]

Cuba es uno de los países más desarrollados en este ámbito dentro de América Latina, ya que promueven su instalación desde la década de los 80 en lugares de interés público como pueden ser escuelas, hospitales y guarderías.[13]

No ha surgido hasta hace relativamente poco tiempo el interés de implementación de esta tecnología en el sector residencial, por la falta de medios, estando

recogido en las tareas de acción del decreto ley 345, con la futura instalación de 20 mil metros cuadrados de calentadores de producción nacional.

También se refleja la necesidad de creación de productores locales a pequeña escala de los calentadores solares para poder cumplir los objetivos marcados. Además, en este decreto se recogerá el precio de los futuros calentadores para el mercado minorista que oscilarán en torno a los 40 dólares, para calentadores compactos sin accesorios.[12].

Ante esta situación, no podemos olvidar que el salario no supera los 40 dólares en el mejor de los casos.[14]

2.4 Tecnologías renovables en el contexto residencial en Cuba: particularidades de los calentadores solares.

Los llamados calentadores solares son equipos que utilizan la radiación solar con el propósito de calentar agua. Son sencillos y presentan gran resistencia, por lo que su vida suele ser de unos veinticinco años.

El agua que calientan estos aparatos puede alcanzar los 90°C, proporcionando agua caliente todos los días del año. No requieren de gran mantenimiento y sobre todo, lo más importante, no son contaminantes.

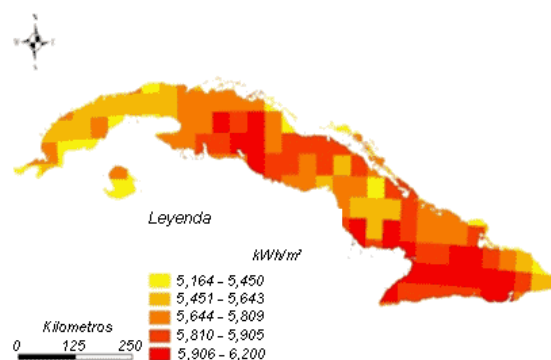


Figura 8: Radiación diaria de Cuba. [15]

Como se muestra en la Figura 8, en Cuba inciden una media de 5 KWh diarios por metro cuadrado.

En Cuba, el consumo promedio diario de agua caliente en una vivienda de 4 personas es de unos 100L a 37 ° C, para lo que se requiere una energía de unos 3 Kwh. Por tanto, 2 metros cuadrado de colectores solares serían capaces de cubrir casi la totalidad de las necesidades de agua caliente de dicha vivienda. Al ser superior la radiación que la energía requerida, por muy bajo que sea el rendimiento del colector, sería suficiente para cubrir la demanda. Sólo habría problemas en el aprovechamiento de esa energía térmica a la hora del almacenamiento.

Con este potencial y siguiendo las líneas del decreto 345, se empiezan a desarrollar diferentes modelos de calentadores solares con el objetivo de realizar una producción nacional capaz de abastecer los planes a desarrollar por dicho decreto. Para ello, se ponen en marcha diferentes modelos de fabricación nacional, ya que los modelos que se producen actualmente no son los ideales para el sector residencial, aunque presenten alta calidad.

En Cuba se pueden encontrar los tres principales tipos de colectores para calentamiento de agua en función del tipo de instalación o sistema de almacenamiento. Estos pueden ser sistemas de circulación forzada del fluido absorbedor para instalaciones grandes y de alto consumo o mediante la circulación natural provocada por un sistema de termosifón, para consumos moderados, sencillos y fiables teniendo en cuenta los problemas hídricos y de suministro de electricidad.

En un sistema de termosifón, el fluido captador suele ser el agua que va a cubrir la demanda, presentando solo un circuito hidráulico. Como podemos observar en la *Figura 9*, el agua circula por dentro del absorbedor y del tanque de almacenamiento. Este está situado siempre en una cota más alta que el plano captador, circulando el agua gracias a la diferencia de densidad al aumentar de temperatura, almacenándose en el tanque el agua caliente por su menor densidad.

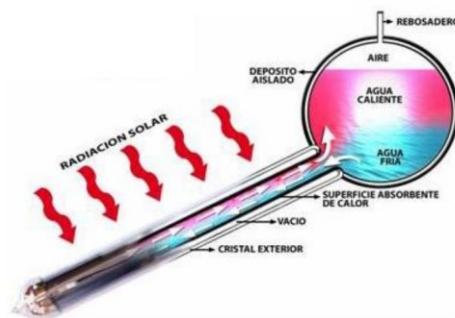


Figura 9: Ejemplo efecto termosifón con captador de tubos al vacío.[13]

Existen tres principales tecnologías de calentamiento solar. Éstas son calentadores o colectores solares de tubos al vacío, calentadores de placa plana y por último, calentadores compactos.

2.4.1 Calentadores solares de tubos al vacío.

En los calentadores solares de tubos al vacío la radiación es percibida por el absorbedor y llevada en forma de calor hacia un tanque acumulador, ya sea a través de dos circuitos mediante la circulación forzada del fluido captador, o por el contrario, por uno sólo mediante termosifón.

En este tipo de colector solar el absorbedor está formado por tubos en los que se ha hecho vacío para disminuir las pérdidas por convección, como podemos observar en la *Figura 9* y *Figura 11*. Dichos tubos presentan una baja emisividad y una alta absorptividad.

Este tipo de sistema de fabricación nacional es de los más comunes en Cuba junto con el sistema de termosifón, ya que resulta mucho más sencillo en cuanto a instalación y costes asociados al uso y mantenimiento, como se observa en el ejemplo de instalación en la *Figura 10*.

Además, gracias a la radiación disponible en este país, el sistema de circulación del agua dentro del termosifón es óptimo, no resultando tan ventajoso el sistema de

circulación forzada con dos circuitos diferenciados, como es habitual en otras instalaciones en climas más fríos. Por todo ello, presenta una alta implantación en edificios públicos y de interés común dentro de la isla.[16]

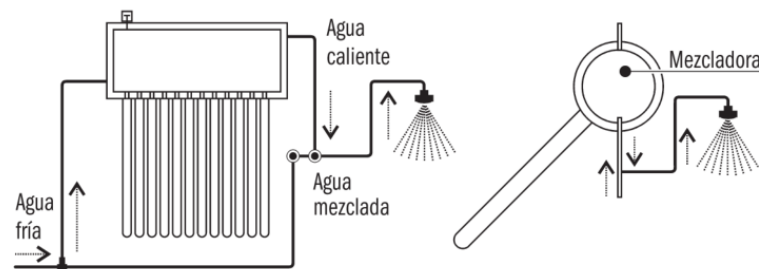


Figura 10: Ejemplo de un sistema de tubos al vacío con termosifón.[16]



Figura 11: Ejemplo real, colector y tanque termo sifónico de tubos al vacío.[17]

Algunas de las características principales de los calentadores solares de tubos al vacío son las siguientes:

- Es un colector fabricado con alta calidad y alto rendimiento, derivados de su complicada fabricación y altos costes asociados.
- El aprovechamiento de la radiación permite lograr temperaturas superiores a los 40°C en días totalmente nublados y en días de radiación normal en Cuba llega a temperaturas superiores a 75-80°C .
- Los tubos de vidrio de este tipo de calentador, a pesar de las características citadas anteriormente, presentan gran fragilidad ante ciertas inclemencias climatológicas y temperaturas demasiado altas, pudiendo llegar a explotar.
- Requieren de un mantenimiento exhaustivo. El calentador tiene que estar limpio y en perfectas condiciones para su rendimiento óptimo.
- Por último destacar que la fabricación de estos calentadores está empezando a producirse a nivel nacional, aunque no es el más adecuado para instalaciones sencillas en el sector residencial por su coste (unos 175 \$/m²), aunque sí para grandes edificios como hoteles, donde su implantación ya es una realidad.

2.4.2 Calentadores de placa plana.

Los calentadores o colectores de placa plana tienen el mismo principio de trabajo que los de tubos al vacío. Se diferencian en que el fluido captador circula por una placa plana o por diferentes tubos en forma de zigzag recubierto de un aislante térmico en forma de caja, situado a los lados y por debajo de la placa. Además, presenta un vidrio o plástico en el parte superior denominado cubierta transparente. Este tipo de tecnología la podemos ver ejemplificada en la *Figura 12*.

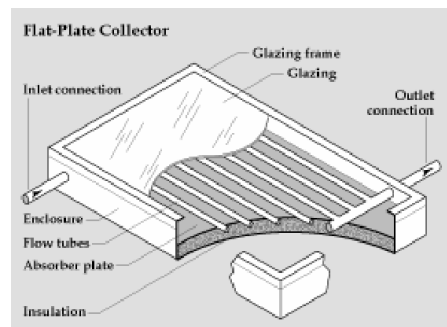


Figura 12: Modelo de calentador solar de placa plana.[13]

El plato plano es una placa metálica, normalmente de aluminio, conductora del calor y con baja capacidad calorífica que se encarga de absorber toda la energía solar posible, siendo muy poca la radiación infrarroja reflejada. Esto se consigue aplicando a la placa diferentes tratamientos, además de un acabado negro mate.

Al igual que los tubos presentes en los calentadores solares de tubos al vacío, los tubos o plato absorbedor de los calentadores de placa plana presentan una baja emisividad y alta absorptividad.

La cubierta transparente tiene como finalidad dejar pasar la radiación solar hacia el plato de absorción y disminuir la pérdida de calor por convección y radiación. Ya sea esta de vidrio o un material plástico. Este último menos recomendado por la opacidad que puede presentar por el desgaste a la radiación solar.

Presenta una eficiencia menor que los captadores de tubos al vacío, siendo de un 50 % este rendimiento y dependiendo de las condiciones de uso y climáticas.

Las características de los calentadores solares de placa plana son:

- Su eficiencia es menor que los captadores de tubos al vacío, siendo como máximo de un 50 % este rendimiento y dependiendo de las condiciones de uso y climáticas.
- En días nublados se pueden alcanzar temperaturas en torno a 40 °C, pero con mayor dificultad que los de tubos al vacío.
- Como desventaja encontramos la fragilidad del vidrio, por lo que puede romperse. Además, por su forma cuadrada, plana y delgada actúan como de una vela se tratase ante fuertes vientos y ciclones, por lo que se recomienda desmontarlo en dichas circunstancias.
- El coste de estos resulta d los más barato, unos 120 \$/m².

2.4.3 Calentadores compactos

En los países tropicales, en los que el agua nunca se congela, se suelen utilizar este tipo de calentadores solares, los llamados calentadores compactos. Estos presentan un tanque acumulador que recibe directamente la radiación solar. Son sencillos, de bajo costo y, generalmente, eficientes. Se diferencia principalmente de los demás colectores en que no precisa de tanque de almacenamiento, sino que es el propio colector el tanque acumulador de agua caliente.

Como podemos observar en la *Figura 13* y *Figura 14*, un calentador solar compacto está formado por un recipiente cerrado y pintado de negro. Tiene una entrada y salida de agua y está aislado por los lados y el fondo del recipiente. En la parte superior se coloca un material transparente, como puede ser el vidrio. En la zona superior es donde va a incidir la radiación solar.

Es recomendable que ésta cubierta de vidrio esté inclinada para aprovechar más la radiación solar en los meses de invierno.

En la parte superior del recipiente se sitúa una tubería con un diámetro adecuado para soportar la presión del fluido, ya que el diámetro influye en el comportamiento del calentador, en parámetros como la temperatura y cantidad de agua disponible.

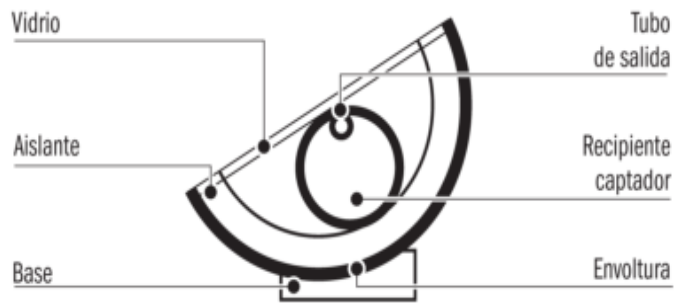


Figura 13: Corte trasversal del recipiente del calentador solar compacto.[16]



Figura 14: Calentador solar compacto fabricado en Cuba.[18]

El recipiente puede estar fabricado también con una tubería de aluminio, acero o PVC de diferentes diámetros que van a condicionar el funcionamiento y eficiencia del colector solar compacto. A mayor diámetro mayor volumen de agua y menor temperatura.

En la *Figura 15* se puede apreciar la estructura del recipiente captador acumulador, destacando la diferencia de cotas que debe existir entre la entrada y la salida. Esta última se sitúa siempre a mayor altura para conseguir toda el agua caliente que ha subido hacia la parte superior por presentar menor densidad que el agua fría.

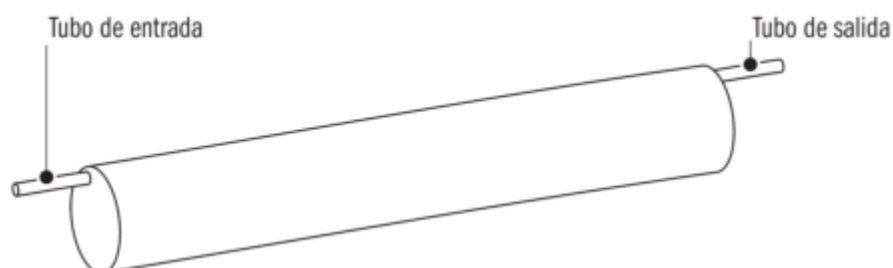


Figura 15: Recipiente captador acumulador[16]

Este tipo de calentadores en climas tropicales y gracias a la alta radiación, presentan un rendimiento muy similar a los de placa plana, alrededor del 50%, siempre y

cuando la temperatura de trabajo requerida no supere los 55°C, por lo que resultan ideales para pequeñas y medianas instalaciones en el sector residencial.

Características de los calentadores solares compactos:

- Es el tipo de calentador más utilizado en los países tropicales.
- Si está bien aislado puede conservar el agua caliente incluso por la noche, cuando las temperaturas son más bajas.
- La cubierta de vidrio es frágil.
- En cuanto a fabricación, los calentadores compactos son los más sencillos del mercado.
- No requieren mantenimiento.
- Al igual que otros calentadores, puede alcanzar los 40 °C en días de poca radiación.
- Puede trabajar a temperaturas de 50°C con un rendimiento superior al 50%.
- Al contrario que los calentadores de placa plana, los calentadores solares compactos resisten vientos fuertes, por lo que no hace falta desmontarlos en caso de ciclones.
- El coste de estos está en torno los 150 \$/m².

2.5 Aspectos técnicos y socioeconómicos relacionados con el consumo de agua caliente sanitaria

Un factor importante a tener en cuenta es el factor económico, ya que tenemos que ser conscientes de la economía disponible en un hogar medio para poder justificar la viabilidad de estas tecnologías. Evaluar el salario medio sirve de indicador para valorar el presupuesto disponible del sector residencial, sin dejar de tener en cuenta la gran economía sumergida existente en el país, en estas estimaciones.

Al ser difícil estimar dicho presupuesto, tenemos en cuenta solo lo que se puede calcular a base de datos, que es la parte del salario destinada a cubrir las necesidades energéticas para poder valorar esta tecnología y la viabilidad de su implantación. Podemos estimar el salario medio en unos 20 dólares, como se afirma en un numerosas publicaciones y prensa.[10, 14]

Otro de los aspectos para poder entender a situación, son los numerosos cortes del suministro de electricidad que sufre la provincia, ya que es frecuente algún corte

semanal de varias horas, muchas veces provocados por las potencias pico demandas de la red de consumidores y el mal estado del sistema de distribución, con averías frecuentes.

Según los datos recogidos y consultados, la provincia de Holguín tiene una temperatura ambiente mínima en los meses más fríos de 24 grados en horas centrales del día. La temperatura del agua de red no suele bajar de los 15 grados. Aun así, esta temperatura es realmente mayor cuando llega al usuario, debido a que el abastecimiento del agua de red no es permanente, sino que el agua de red llega solo unas horas al día.

Como consecuencia, para asegurar una disponibilidad permanente, prácticamente todos los edificios disponen de un gran tanque de almacenamiento en sus azoteas para recoger gran cantidad de agua y cubrir la demanda hasta el día siguiente. Con estos tanques expuestos al sol y gracias a la moderada temperatura mínima y la alta radiación, dichos tanques sufren un precalentamiento debido al equilibrio termodinámico entre el ambiente y el tanque. La temperatura del agua de red en los edificios podríamos considerarla en unos 20 grados en la época más fría del año.

La *Figura 16* representa la demanda de agua caliente sanitaria en el sector residencial en la provincia de Holguín, Cuba. Según datos de la ONEI, se pueden observar los hábitos de consumo diario de la población. Cabe destacar que la siguiente gráfica es similar a la de consumo de electricidad de un día laborable, ya que los picos de máximo consumo coinciden.[9]

Por ejemplo, en el intervalo horario de las seis a las ocho de la mañana se observa un pico de consumo debido al pequeño aseo personal. El siguiente pico de la gráfica, situado a las doce del mediodía, coincide con su hora del almuerzo o comida. Puesto que en el país de Cuba, y más en la provincia de Holguín, los productos básicos son escasos, utilizan el agua caliente para desengrasar los utensilios de cocina, haciendo en este intervalo horario mayor uso del ACS.[7]

Por último, entre las seis y las ocho de la tarde los cubanos suelen aprovechar para ducharse, por lo tanto, es en esta franja horaria es donde encontramos el ultimo pico de consumo máximo del día.

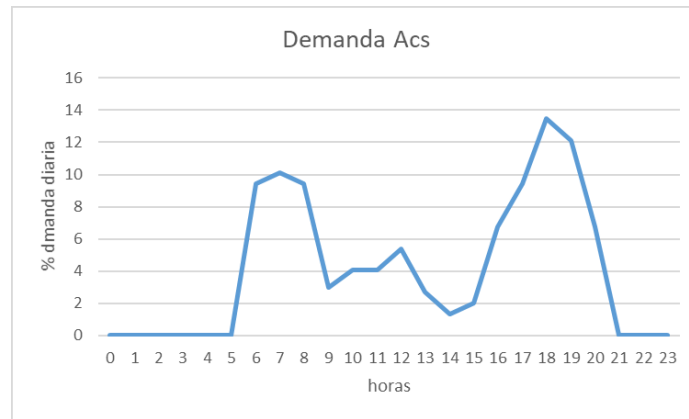


Figura 16: Grafica de la demanda de consumo de ACS en el sector residencial de Cuba.

La temperatura del agua requerida en dicho sector residencial, debido al clima que presenta, es de unos 36–37°C.

Para diversas actividades cotidianas, los cubanos calientan el agua. Algunas de las tecnologías utilizadas para ello son, entre otras, el tirabuzón eléctrico (en un 77% de los hogares), la jarra y la hornilla eléctrica como utensilios habituales de cocina (14%). Podemos observar estas tecnologías en la *Figura 17*..[7]



Figura 17: Hornilla (izquierda) y tirabuzón eléctrico (derecha).[19]

Además, como podemos ver en la siguiente figura, al calentar agua en recipientes relativamente pequeños, se acostumbra a elevar mucho la temperatura para la posterior mezcla con agua fría y conseguir un volumen de agua mayor. Esto supone, como podemos observar en la *Figura 18* un gran aumento de la energía, ya que dicha energía necesaria para conseguir un volumen de agua determinado a 37°C, es mucho mayor si la obtenemos mezclando una pequeña cantidad a alta temperatura con agua fría.

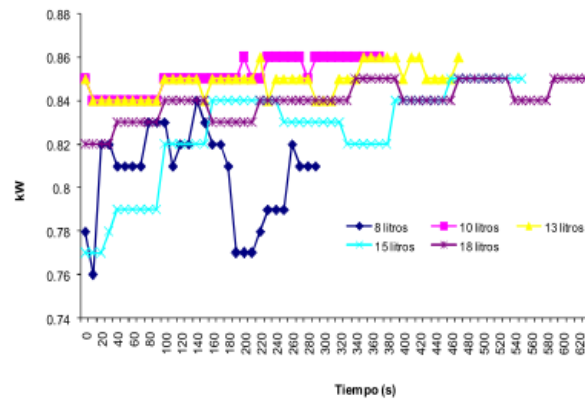


Figura 18: Consumo electricidad del tirabuzón eléctrico para diferentes volúmenes, para una temperatura de 37°C.[19]

Según los datos mostrados y los requisitos que recoge la norma cubana NC-176 sobre "sistema de abasto de agua en edificios sociales. Requisitos de proyectos" podemos concluir que la temperatura requerida para el agua caliente es de 37 °C y un volumen de 50 litros por persona y día.[20]

El promedio de consumo de electricidad en un hogar es de 162 KWh por mes y realizando una aproximación con los valores fijados para temperatura y volumen antes mencionados, en una casa de 4 personas que calienten el agua todos los días destinarían al menos 80KWh todos los meses para dicho propósito, suponiendo un rendimiento del 100% en el proceso de calentamiento. Lo que equivaldría a 14 Kg de CO₂ por mes.[21]

CAPÍTULO III: DISEÑO DE LA INSTALACIÓN

En este capítulo se va a desarrollar el diseño fabricado, así como la modelización teórica del prototipo, además de la construcción, costes y materiales.

3.1 Aspectos iniciales

Teniendo en cuenta toda la tecnología disponible y la necesidad de cubrir una demanda en la producción de ACS, se va a realizar el diseño de un prototipo de calentador solar compacto.

Para ello, se van a valorar diversos factores como ambientales, económicos, sociales, disponibilidad de materiales, facilidad de uso, fiabilidad, reparación y fabricación, para que su implantación a medio plazo pueda llevarse a cabo.

Este será un prototipo de calentador solar compacto, debido a su sencillez y buen funcionamiento en un clima tropical en el que las demandas no sean demasiado altas.

3.1.1 Condiciones locales.

El principal recurso, y fruto del cual surge el diseño del prototipo, son los barriles típicos de aceite industrial, (*Figura 19*), los cuales son un excedente en la industria del níquel del municipio. De hecho, estos barriles son habituales para almacenamiento de agua en azoteas. Son ideales para constituir la base y la caja del calentador solar compacto.



Figura 19: Ejemplo barril aceite industrial.[22].

Un factor importante a tener en cuenta es el tipo de azotea. En Cuba, normalmente, las azoteas están fabricadas con una placa de hormigón forjado, por lo que

son planas y accesibles. Esto supone que sea el lugar idóneo para la instalación de este tipo de sistemas. No presenta ningún problema estructural el instalar este tipo de calentadores en la mayoría de los edificios, siendo capaces de soportar el peso de grandes depósitos de agua.

Con este barril y los materiales restantes se pretende la construcción del prototipo, pero antes de empezar con cualquier tipo de diseño ni valoración técnica de funcionamiento, se realiza un estudio de la influencia de la orientación e inclinación atendiendo a la demanda típica de agua caliente (*Figura 16*) para poder asegurar la disponibilidad e intentar reducir las pérdidas térmicas derivadas del almacenamiento, al no saber la calidad del aislante del prototipo.

3.1.2 Localización y orientación.

La instalación y diseño se realiza en Moa, provincia de Holguín (Cuba). Este lugar geográfico se encuentra a una latitud (ϕ) de 20,66 grados y una altura de 20 metros sobre el nivel de mar

En primer lugar, para poder fijar la inclinación adecuada, se aplica un modelo de cielo isotrópico para posteriormente obtener la *Figura 20*. Estos cálculos se han realizado a partir de la irradiancia e irradiación, directa y difusa a lo largo del año, sobre plano horizontal en el municipio de Moa.[23]

En este modelo isotrópico, toda la irradiación difusa es considerada isotrópica, es decir, que se analiza toda ésta independientemente de la dirección en la que se encuentre respecto al plano. Este modelo más simplificado que otros (modelo Anisotrópico de Davies, Klucher y Reindl) sirve perfectamente para realizar estas estimaciones de forma lo suficientemente precisa, donde además, la proporción de radiación difusa es baja en comparación con otros climas.[24]

En base a la bibliografía (B. Duffie, 2013) en la siguiente ecuación se puede observar la relación que existe entre la irradiación difusa y directa del plano horizontal respecto al plano inclinado y orientado.

$$I_T = I_b R_b + I_{d,iso} F_{c-s} + I \rho_g F_{c-g}$$

Donde los factores de forma F vienen dados por las siguientes expresiones, así como la reflectividad del suelo ρ_g en este caso 0,2.

$$F_{c-s} = \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right)$$

$$F_{c-g} = \left(\frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right)$$

Teniendo en cuenta tanto la orientación como la inclinación no se puede tomar ninguna simplificación para obtener la relación(R_b) entre la radiación directa sobre el plano inclinado y el horizontal. Como se observa en las siguientes ecuaciones.

$$R_b = \frac{\text{radiación total sobre plano inclinado}}{\text{radiación total sobre plano horizontal}} = \frac{I_T}{I} = \frac{a}{b}$$

Donde a y b:

$$\begin{aligned} a = & (\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma) \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi \\ & + (\cos \delta \cos \phi \cos \beta \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma)(\sin \omega_2 \\ & - \sin \omega_1) - (\cos \delta \sin \beta \sin \gamma)(\cos \omega_2 - \cos \omega_1) \end{aligned}$$

$$b = (\cos \phi \cos \delta)(\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + (\sin \phi \sin \delta) \frac{1}{180} (\omega_2 - \omega_1) \pi$$

A partir de los datos recogidos de años anteriores sobre la irradiación e irradiancia directa y difusa en el plano horizontal, y calculando el resto de variables de las ecuaciones anteriores, según indica la bibliografía (B.Duffie, pag88), se puede obtener un valor de la Irradiación en cualquier plano inclinado y en cualquier orientación, ya sea para la media diaria de un mes, o para la irradiación horaria de un día cualquiera a lo largo del año. De esta forma se pueden valorar ambos comportamientos.[25]

En este caso, se analiza la implicación de la orientación e inclinación. Para optimizar al máximo el diseño, en primer lugar, se analiza la implicación del cambio de inclinación a lo largo del año, ya que el comportamiento cambia a medida que pasan los meses, como se puede observar en la *Figura 20*.

También se representa en dicha figura las temperaturas medias de cada mes para realizar una comparativa con la radiación media diaria de ese mes. De esta forma, se obtiene la inclinación más favorable para los meses de menos temperatura, donde se requiere un mayor consumo de agua caliente. Así, podremos optimizar al máximo la captación del prototipo cuando resulte más necesaria.

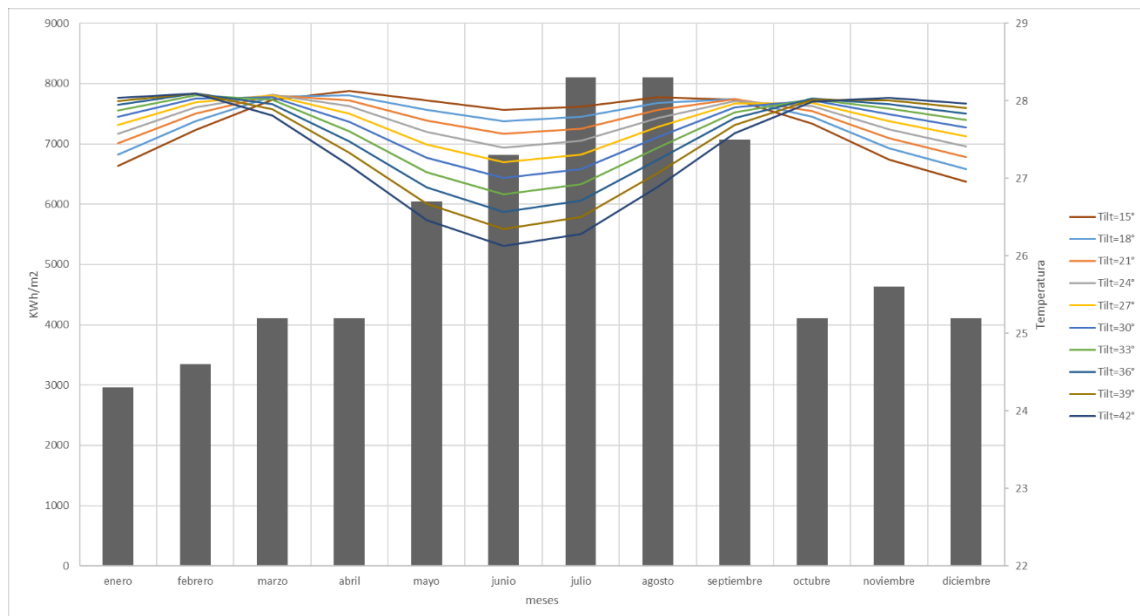


Figura 20: Irradiación en función de la inclinación y temperatura a lo largo del año

Otro factor a tener en cuenta de nuestra instalación del prototipo es la orientación o Azimut, es decir, la orientación respecto al sur.

La *Figura 21* muestra la Irradiancia sobre el plano inclinado a lo largo del día. En este caso, el día 15 de enero. Tomamos esta fecha como referencia por tratarse de uno de los meses menos favorables.

Los diferentes valores de orientación influyen en el comportamiento de la Irradiancia a lo largo del día, desplazando la curva hacia la derecha o izquierda en función de su orientación hacia el este u oeste, obteniendo así, mejores resultados por la mañana o por la tarde.

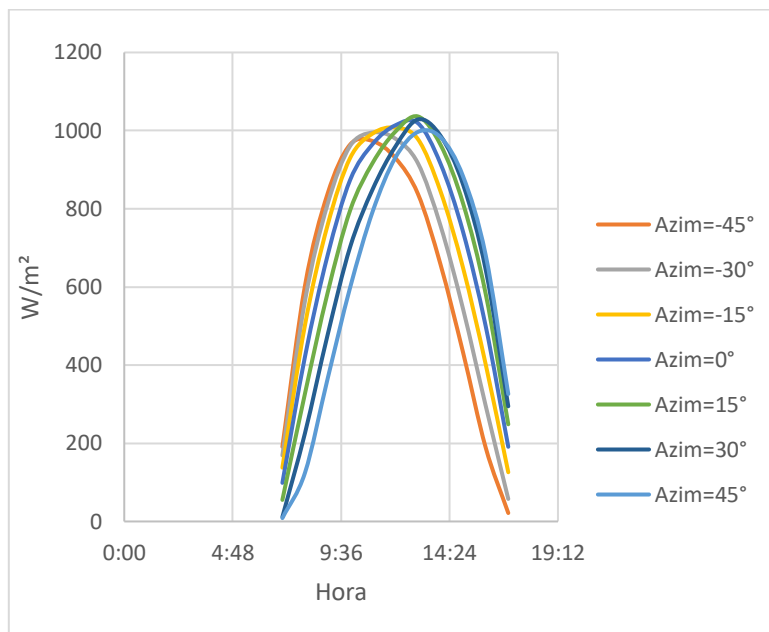


Figura 21: Irradiación en función de la orientación a lo largo de un día

Con esta inclinación cabe esperar la obtención de mejores resultados en los meses fríos, cuando son más necesarios. Además, la orientación escogida favorece la obtención de un nivel más alto de radiación en las últimas horas del día, desplazando la curva de radiación hacia la derecha, con el objetivo de que coincida el pico de demanda de ACS con la mayor radiación disponible.

Por todo ello, se selecciona una inclinación de 33 grados orientada 18 grados respecto al sur. Como se observa en la *Figura 22*, el comportamiento a lo largo del año resulta mucho más beneficioso que en el plano horizontal, sin que sea contraproducente debido a la orientación de 18 grados.

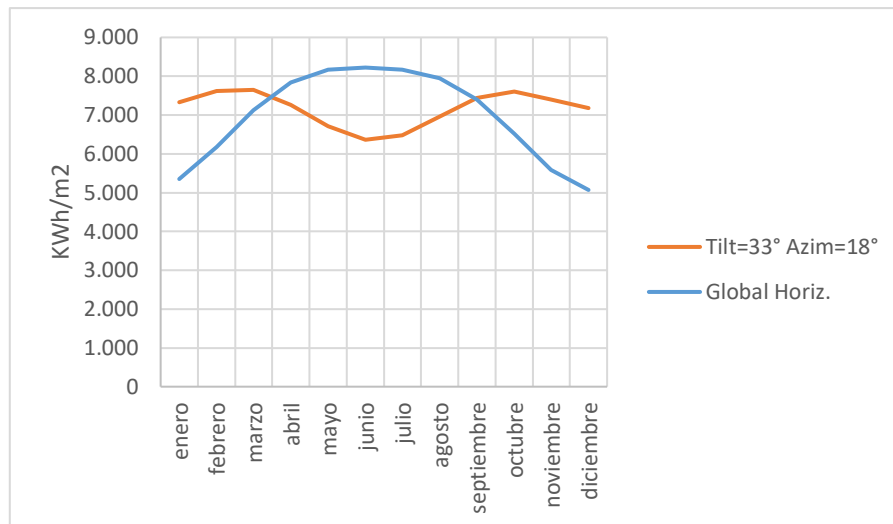


Figura 22: comparativa de la Irradiación del plano horizontal con la inclinación y orientación escogida a lo largo del año

En la *Figura 23* se muestra la Irradiancia el día 15 de enero en el plano horizontal y en la orientación e inclinación mencionadas anteriormente. Se observa la implicación de la orientación del prototipo desplazando la curva hacia la derecha, para así ajustarse al máximo la captación de energía solar con la demanda de ACS como se ha comentado anteriormente en la *Figura 16*.

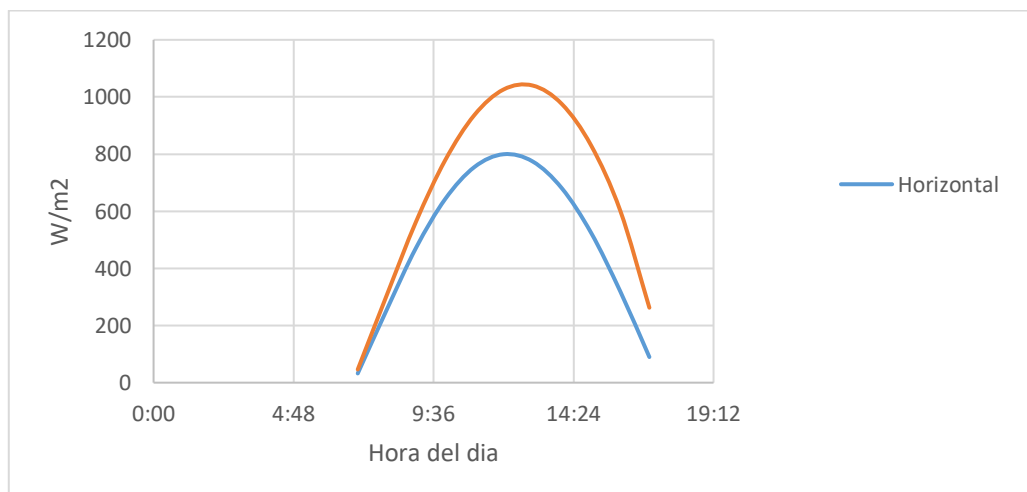


Figura 23: comparativa de la Irradiancia del plano horizontal con la inclinación y orientación escogida a lo largo del día

Este análisis tiene especial interés para mejorar la eficiencia y ajustar lo máximo posible la demanda a la producción de ACS y así, reducir las pérdidas por almacenamiento. Al tratarse de un prototipo fabricado con materiales sencillos y al no disponer del vidrio ni aislante más adecuado, debemos priorizar esto último para suplir estas carencias.

3.1.3 Elección de la tecnología y materiales.

Para el desarrollo de la investigación y todos los cálculos teóricos se fijan los requisitos mínimos para un volumen de agua de 50 Litros a 37°C y una temperatura de agua de red a 18°C. Considerando que el valor de la capacidad calorífica del agua es fijo al no presentar grandes variaciones de temperatura se puede estimar el calor necesario según la siguiente ecuación:

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T = 50 \cdot 1,16 \cdot (37 - 18) = 1102 \text{ Wh}$$

De la ecuación anterior obtenemos que la energía necesaria para conseguir la demanda de ACS para el día 15 de enero, es de aproximadamente 1,1 KWh.

Para obtener el valor del rendimiento global del panel suponiendo un metro cuadrado de área efectiva, se utiliza la siguiente ecuación, sabiendo que la Irradiación para dicho día es de 7200KWh/m²

$$\eta = \frac{Q}{I_T A_c} = 15,2\%$$

Obtenemos que el rendimiento global es de un 14%. Este dato sirve para demostrar el potencial de la energía solar en un clima tropical, ya que, con un valor de rendimiento tan bajo, se puede llegar a cubrir la demanda sin problemas.

También se tendrá en cuenta el aprovechamiento de esa energía en función de las horas de usos, ya que las pérdidas de calor por almacenamiento del agua no pueden ser despreciadas. También nos aporta buenos pronósticos a la hora de la construcción de nuestro prototipo, puesto que éste nunca llegará al rendimiento de uno comercial, ya que es de un 50 %.

Esta primera estimación es válida solo para entender el potencial de la radiación y los objetivos mínimos que debemos marcar para el prototipo, ya que no se está teniendo en cuenta ni la cantidad de agua que se encuentra dentro del calentador, ni cómo evoluciona la temperatura a lo largo del día en función de la cantidad de agua que estemos demandando a nuestro colector-acumulador. Para ello, primero se comparará qué sucede cuando variamos el volumen de agua que podemos almacenar en este calentador, para una misma Irradiancia fija.

El volumen de agua almacenada en el calentador compacto es proporcional al diámetro de la tubería acumulador que contenga en su interior. Estos diámetros son medidos en pulgadas por ser comerciales y estándares de fabricación disponibles para su compra en la zona. Como se muestra en la *tabla 1*.

Tabla 1: Diámetro y volumen de la tubería

PULGADAS	D. EXTERIOR (mm)	LITROS/METRO
4	101,6	7,2
6	152,4	16,3
8	203,2	29,3

Se analiza el incremento de temperaturas y calor dentro de una tubería de diferentes diámetros, para una irradiancia fija, a partir de los datos recogidos experimentalmente. En la *Figura 24*, se representan y ajustan los valores del comportamiento de un calentador compacto en función del diámetro de tubería que tenga.[16]. Estos datos son tomados para un día de irradiación media en Cuba, 5320 KWh/m². La temperatura de agua de red en este experimento es de 25°C y los datos se recogen en la puesta de sol.

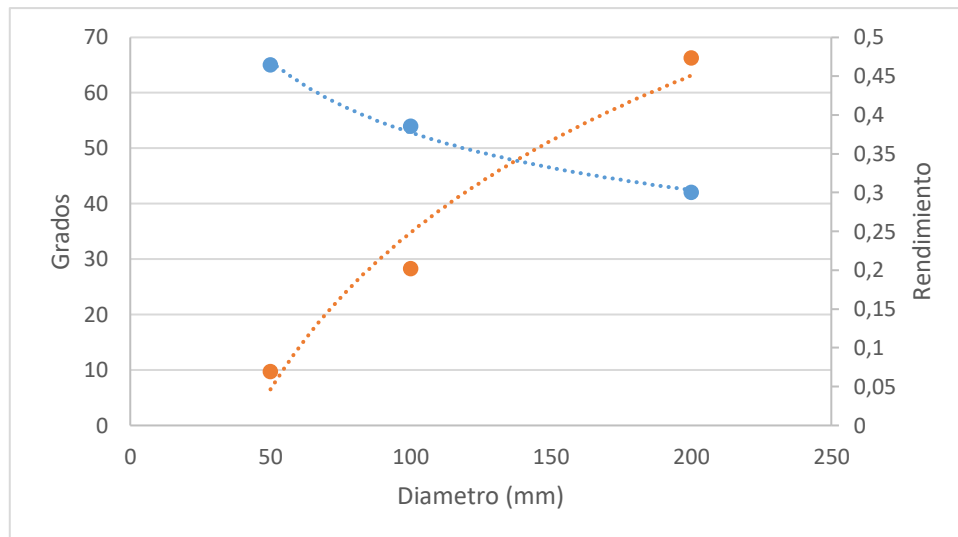


Figura 24: Influencia del diámetro de tubería en los calentadores compactos.

De este análisis se deduce que, a mayor diámetro de tubería, mayor volumen de agua por metro de calentador y mayor rendimiento, pero se alcanzará menor temperatura al final del día. Por tanto, la tubería ideal será aquella que permita obtener la temperatura deseada en los días de menos radiación y así obtener el mayor volumen de agua directamente del calentador sin mezclar con agua fría.

El siguiente punto a desarrollar es la lista de materiales utilizados del diseño final del prototipo.

Dichos materiales se muestran en la *tabla 2*, dividiéndose en dos categorías, básica y de mejora, en función de lo que se considera básico para el funcionamiento del colector y lo que puede ser considerado una mejora de rendimiento a posteriori.

En esta lista se aprecia que la tubería que almacena el agua y recibe la energía solar es finalmente de 4 pulgadas (100 mm), ya que es el diámetro más habitual en el mercado, por lo que resultó ser la única que se pudo comprar, aunque lo ideal como se ha visto hubiera sido una de mayor diámetro para los requerimientos que se han impuesto de funcionamiento.

Tabla 2: Lista de materiales

CATEGORÍA.	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	COSTES UNITARIOS (\$)
Básica	Barril Castrol	2	0
	Metro pvc 4 in	1	4
	Codo 90	2	2
	Llave de paso	1	5
	PVC conexiones/ metros	1,5	2
	Contracción PVC	2	2,5
	Pintura negra	1	0,5
	Cubierta traslucida (60x90)	1	0
	Varillas hierro para soporte	1	0
	Cámara de bicicleta	1	0
Mejora	Aislamiento	1	-
	Silicona para el sellado del vidrio	1	-

Además, en la *tabla 2* figuran los precios de adquisición de los materiales, estos precios son más costosos de lo habitual por ser pequeñas cantidades las compradas, pero si se llegase a desarrollar un modelo de negocio o la posible implementación, los costes serian considerablemente menores.

También se tiene que tener en cuenta que para este prototipo se reciclaron diferentes materiales, que no supusieron ningún coste, ya que tanto el vidrio, la cámara de bicicleta o los barriles son materiales reciclados.

Aun así, el presupuesto inicial de 25 \$, sería difícil de sobrepasar en una futura producción local teniendo en cuenta los bajos costes de los materiales en general. Si se mantiene el objetivo de aprovechar los desechos.

3.2 Diseño y montaje de la instalación.

En este punto de la fase de concepción del prototipo se realiza un diseño simplificado en un software de CAD-3D para obtener las dimensiones reales del prototipo a usar, así como la fabricación y montaje. Esto se puede observar en la *Figura 25* y *Figura 26*

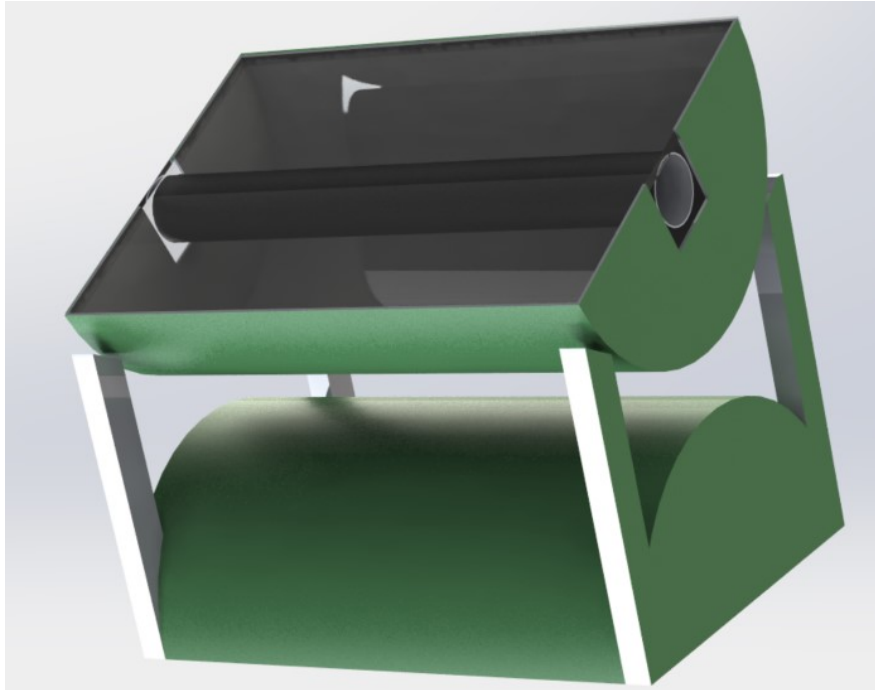


Figura 25: Render del diseño 3D

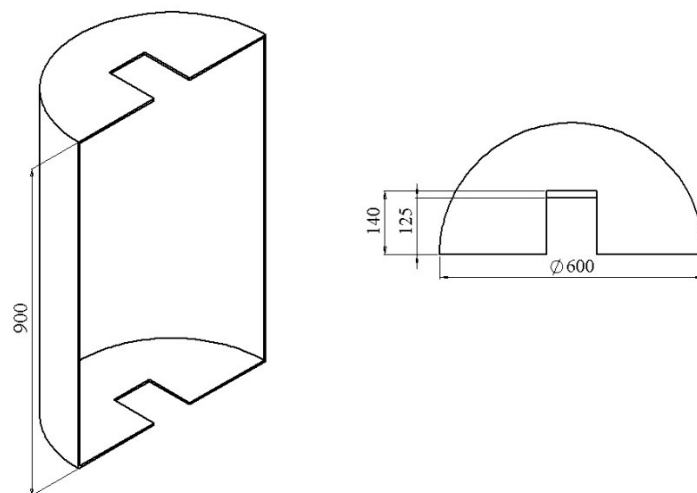


Figura 26: Dimensiones principales de la caja aislante del colector

El esquema de la instalación es el de la *Figura 27* donde se aprecia el tanque de almacenamiento situado a una mayor altura y que este no es más que un tanque para suplir la falta de agua de red permanente. Además el colector ya es su propio acumulador como se ha comentado.

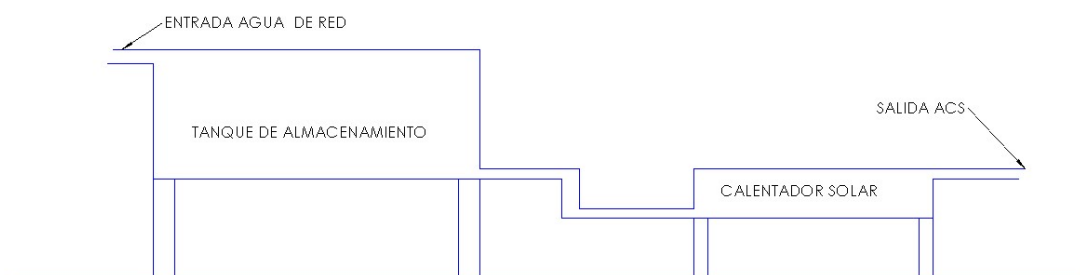


Figura 27: Esquema de la instalación final

En primer lugar, se limpian y preparan dos barriles, uno de ellos será el tanque de almacenamiento de agua, mientras que el otro hará de soporte y caja principal del calentador al dividirlo en dos mitades iguales. En segundo lugar, se suelda la base al calentador por medio de varillas de hierro con la inclinación adecuada.

Se realizan unas aberturas en los laterales del tanque para ubicar la tubería que captará la radiación. De esta manera, la entrada de la tubería desde el tanque de almacenamiento queda en una cota inferior a la de salida para así favorecer la correcta circulación de agua caliente dentro de la tubería.

El tanque de almacenamiento ha de ubicarse a mayor altura que la salida para conseguir un flujo de agua, ya que no hay disponibilidad de agua de red permanente. En este caso se hace uso de una vieja estantería, pero podría ser cualquier objeto que nos proporcione esa diferencia de cota o mismamente varios tanques apilados uno encima de otro.

Por último, se realizan las conexiones hidráulicas desde el tanque al calentador. Para la unión de la salida del tanque se hace uso de una vieja cámara de bicicleta para conseguir estanqueidad. Las demás conexiones se hacen mediante el uso de cola de plástico.

La instalación final se puede ver ejemplificada en la *Figura 28*.a falta de instalar la cubierta transparente y el material aislante en el exterior del calentador.



Figura 28: Instalación real en Cuba.

Los instrumentos utilizados para la recogida de datos son dos termopares analógicos como se puede ver en la *Figura 29*, uno ubicado en la salida del calentador y otro en el tanque de almacenamiento. Además de una llave de paso para regular los flujos en la experimentación, ubicada a la salida.



Figura 29: Termómetros analógicos usados.

La recogida de medidas estaba diseñada para usar un autómatas, pero por motivos ajenos no fue posible ponerlo en funcionamiento el autómatas en la ubicación final. Tras este impedimento se tuvo que instalar dos termómetros analógicos como los de la *Figura 29*.

3.2 Análisis técnicos previos

Se realiza un análisis técnico de la instalación con el objetivo de estimar el comportamiento del prototipo, con especial interés de la evolución en la temperatura dentro del colector. Para ello, tras haber obtenido anteriormente el modelo de cielo y con los datos climáticos de un día concreto, se desarrolla el modelo para la obtención de resultados.

Se escoge este tipo de análisis, a partir de un día medio del mes menos favorable a lo largo del año y no otro, a pesar de los números modelos existentes, ya que el objetivo principal de la instalación es cubrir la demanda en los días más fríos, siendo de menor importancia el rendimiento global a lo largo del año o la sobre producción en verano.

Este modelo teórico, se realiza a lo largo de un día mediante un balance de energía en el colector. Para así estudiar el comportamiento y poder establecer el buen funcionamiento para la curva de demanda, *Figura 16*.

Este balance consta del calor útil del colector (\dot{Q}_u), calor de entrada por radiación (\dot{Q}_e) y unas pérdidas, ópticas y térmicas (\dot{Q}_p), como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_e - \dot{Q}_p$$

Desarrollando la expresión anterior, y asociando las perdidas ópticas al calor de entrada, encontramos los tres términos de la siguiente ecuación, calor útil, energía que atraviesa la cubierta del colector hacia el absorbedor y las perdidas térmicas al final:

$$m C_p \frac{dT}{dt} = G_T A (\tau \alpha)_\theta - U A (T_m - T_a)$$

Las variables significativas en este modelo están discretizadas para intervalos de 15 minutos a lo largo del día, con el objetivo de poder obtener la evolución temporal de los resultados. Estas son: el viento, Irradiación sobre plano inclinado (I_t), temperatura ambiente (T_a) y temperatura de agua de red (T_e), son condiciones iniciales del problema que resolvemos integrando la ecuación anterior para tramos de quince minutos.

$$m C_p (T_f - T_i) = I_T A (\tau \alpha)_\theta - U A (T_m - T_a) \Delta t$$

Para:

Δt = Incremento de tiempo del periodo, 0,25 horas

C_p = Calor especio del agua, considerado constante. 1,16 Wh/(Kg °C)

m = Masa de agua dentro del calentador. Con densidad del agua constante, 7,8 Kg.

Para la evolución temporal de la temperatura del colector, definimos T_i como la temperatura inicial del periodo de 15 minutos y T_f como la temperatura final del mismo. Con la temperatura de agua de red T_e constante para todo el día.

También se realiza estimación de temperatura media dentro del panel como vemos en la siguiente ecuación, que a la vez será también la temperatura para considerar las pérdidas de calor.

$$T_m = \frac{T_f + T_i}{2}$$

Además, se calcula $(\tau \alpha)_\theta$ para todo el día en tramos de quince minutos como se ha mencionado, ya que el ángulo horario (ω) cambia desde el mediodía solar donde tiene valor de 0 grados a razón de 15 grados por hora solar. Las ecuaciones para la obtención serán:

En primer lugar, se calcula el ángulo de incidencia (θ) para cada tramo, como el angulo de refracon (θ_r)

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta \\ & - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

$$\text{sen } \theta_r = \text{sen } \frac{\theta}{n_{1,2}}$$

Donde:

β = Inclinación del colector. 33 grados.

γ = Orientación respecto al sur. 18 grados.

ϕ = Latitud de la ubicación. 20,66 grados

$n_{1,2}$ =Índice de refracción del vidrio. 1,56

Para el cálculo de transividad solar (τ) mediante la transividad por absorción (τ_a) y reflexión (τ_r):

$$\tau = \tau_r \tau_a$$

Con:

$$\tau_a = e^{-\frac{K_a NL}{\cos \theta_r}}$$

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \rho_s}{1 + (2N - 1) \rho_s} - \frac{1 - \rho_d}{1 + (2N - 1) \rho_d} \right)$$

y

$$\rho_d = \frac{\tan^2(\theta - \theta_r)}{\tan^2(\theta + \theta_r)}$$

$$\rho_s = \frac{\sin^2(\theta - \theta_r)}{\sin^2(\theta + \theta_r)}$$

Donde:

ρ_s = Reflexividad de la luz polarizada en el plano de incidencia

ρ_d = Reflexividad de la luz polarizada perpendicular al plano de incidencia.

K_a = Coeficiente de absorción aparente. 4 m^{-1}

N = Numero de cubiertas de vidrio

Por último, para el cálculo de ($\tau\alpha$) para una absorbencia del plato (α) para este tipo de colectores de 0,95, se utiliza la ecuación:

$$(\tau \alpha) = \tau \left(\frac{\alpha}{1 - (1 - \alpha) \rho_d} \right)$$

$$(\tau\alpha)_\theta = (\tau\alpha) \left[1 - 0,2 \left(\frac{1}{\cos\theta} - 1 \right) \right]$$

Por tanto, se obtiene $I_t(\tau\alpha)_\theta$, resultando este valor la cantidad de energía que recibe el absorbedor para el periodo dado, aunque no se tiene en cuenta la proporción de radiación que se refleja dentro del tanque, una vez atraviesa la cubierta y es absorbido por el captador, no debería ser una mala estimación, ya que el interior del tanque no es una superficie pulida que no refleja gran parte de la radiación recibida.

Para calcular la transmitancia térmica (U), la separamos en un coeficiente referente a la conductividad de la caja aislante del calentador U_c y U_f relacionado con las pérdidas convectivas y radiactivas de la cubierta.

$$U = U_c + U_f$$

$$U_c = \frac{2\pi K_a L_a}{Ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)}$$

Donde en U_c se encuentra el coeficiente conductivo (K_a) del aislante, los radios interior y exterior medidos desde el centro del aislante $\left(\frac{R_1}{R_2} \right)$ y la longitud de este (L_a).

Mientras para U_f se hace uso de la siguiente correlación como indica la bibliografía. (Duffie, pag 252):

$$U_f = \left(\frac{N}{\frac{C}{T_m} \left[\frac{T_m - T_a}{(N + f)} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right)^{-1} + \frac{\sigma (T_m + T_a)(T_m^2 + T_a^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.00591 N h_w} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N}$$

Donde:

N = número de cubiertas de vidrio

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \varepsilon_p) (1 + 0.07866N)$$

$C = 520 (1 - 0.000051 \beta^2)$ para $0^\circ < \beta < 70^\circ$; para $70^\circ < \beta < 90^\circ$, utilizar $\beta = 70^\circ$

$e = 0.430 (1 - 100 / T_{pm})$

β = Inclinación del colector (grados)

ε_g = Emisividad del vidrio

ε_p = Emisividad de la placa

σ = constante de stefan boltzmann

T_a = Temperatura ambiente (K)

T_{pm} = Temperatura media de la placa (K)

h_w = Coeficiente de transferencia de calor del viento ($W / m^2 ^\circ C$)

Para h_w se usa la siguiente correlación donde la velocidad el viento (V) en metros por segundo y la longitud de la cubierta transparente en metros (L_c)

$$h_w = \frac{V^{0,6}}{L_c^{0,4}}$$

Por lo que despejando T_m de este modelo e iterando se converge hacia una solución para cada periodo de tiempo, obteniendo así, la evolución temporal de la temperatura a lo largo del día. Como se puede observar en la *Figura 30* el error cometido en estas iteraciones es despreciable.

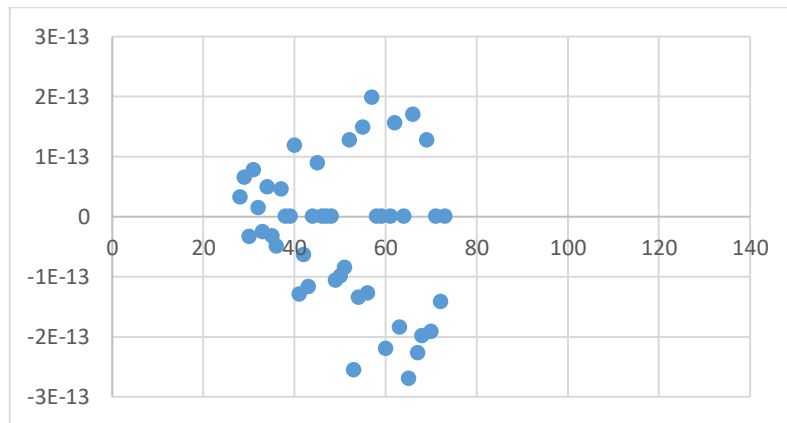


Figura 30 : Erro cometido en las iteraciones.

Con esta evolución temporal de la temperatura se realiza un análisis de las variables que definen el comportamiento para así entender la implicación de cada una de ellas en el funcionamiento del prototipo.

La primera simulación del modelo se realiza suponiendo un aislante térmico en la parte inferior del cantador en la caja que lo recubre.

Con una transmitancia:

$$U_c = 0,05 \frac{W}{m^2K}$$

Finalmente, no pudo ser instalado como se verá más adelante. Aunque esta simulación no sea la que corresponde a la instalación final que se lleva a cabo, resulta interesante evaluar el comportamiento del funcionamiento según los parámetros diseño inicial, además de ver posteriormente la importancia de este.

En la *Figura 31* se representa la temperatura ambiente, la evolución temporal de la temperatura del calentador, el viento medio de cada tramo y la Irradiancia. Mientras que en la *Figura 32* se muestra el rendimiento frente el calor útil del colector.

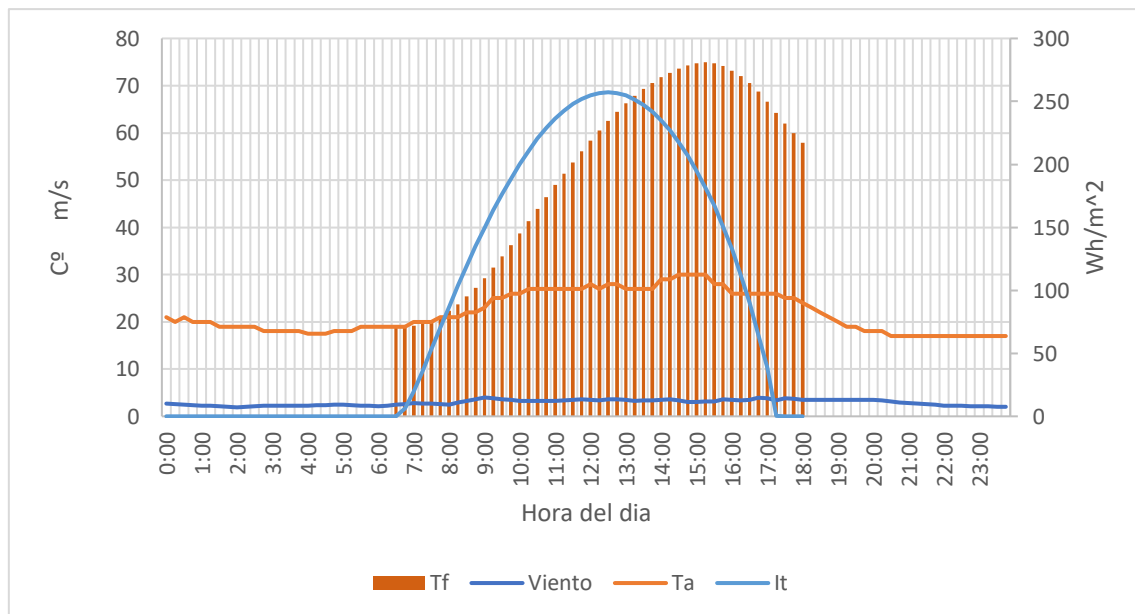


Figura 31. Resultados primera simulacion, modelo con aislante termico.

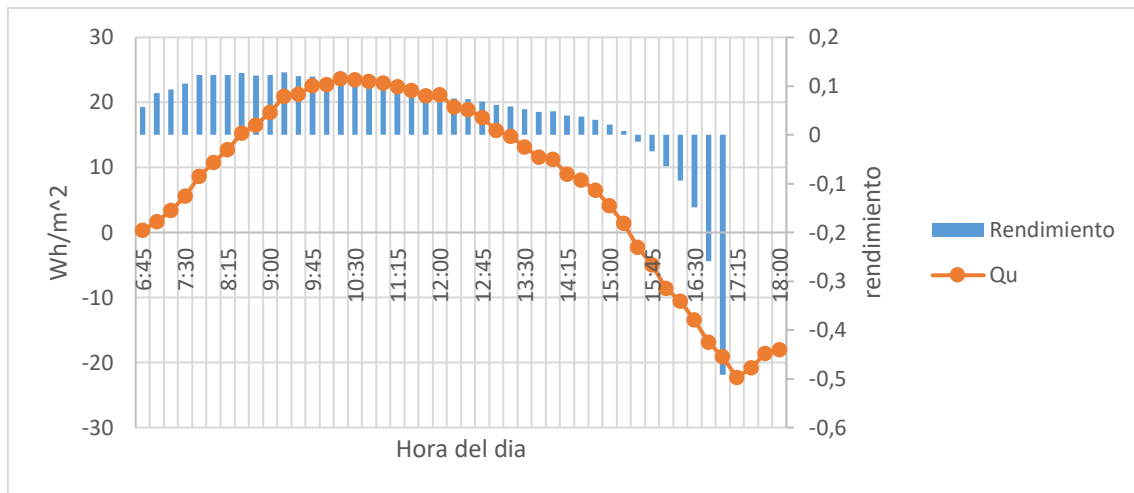


Figura 32 Rendimiento y calor útil de la primera simulación con aislante térmico.

En esta simulación el coeficiente de transmitancia por conducción corresponde a un aislamiento de fino espesor en la parte inferior del tanque, pero, aun así, vemos que el calentador pierde calor suavemente al reducirse la radiación solar, como consecuencia también de haber llegado sobre las 14 horas a una temperatura elevada dificultando aún más el aumento de temperatura por haber llegado a una temperatura de equilibrio con respecto a las pérdidas. Reduciendo de este modo drásticamente su rendimiento hasta valores negativos por la caída progresiva de los valores de irradiación.

Ya que si en este modelo se hubiera extraído agua del calentador al llegar a los 40°C, se aumentaría su rendimiento global, al obtener mayor cantidad de agua caliente y permitido que agua a menor temperatura vuelva a calentarse de nuevo al no llegar hasta una temperatura en la que las pérdidas equiparen al calor útil. Reduciéndose así drásticamente las pérdidas térmicas.

También destacar que al final del día solar, la temperatura es de 42°C no distando demasiado de la que cabría esperar a partir de la Figura 24. Y que la máxima son 75°C, coincidiendo con el pico de radiación máxima.

Al no poderse montar el aislante y anularse del modelo, aumenta significativamente el coeficiente de transmitancia por lo que los resultados empeoran, pero aun así cabe esperar un mínimo funcionamiento gracias a la abundante irradiación y correcta inclinación y orientación que nos ajusta un poco más la curva de la evolución de

temperatura con el pico de demanda de la tarde, al recibir el calentador los últimos rayos de sol de forma más directa.

Como se puede observar en la *Figura 33* la temperatura máxima se sitúa ahora en los 39°C y muy lejos están los 28°C que encontramos al final del día solar incapaces de cubrir cualquier demanda.

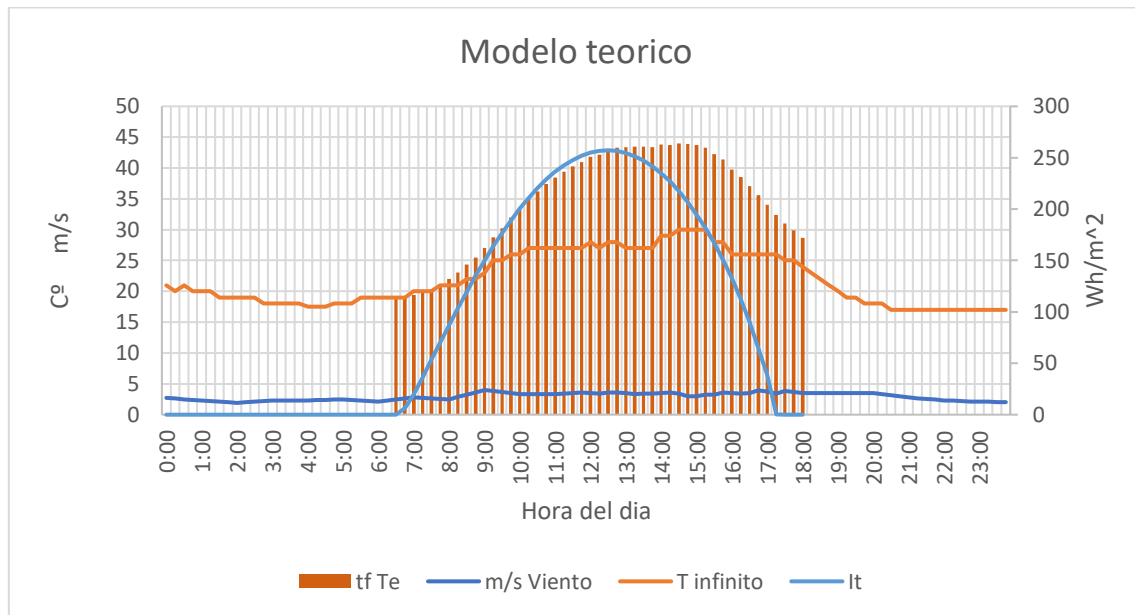


Figura 33 Resultados de la simulacion correspondientes al diseño instalado.

Como se muestra en la *Figura 33* que representa las mismas variables que la *Figura 31*, esta simulación queda dominado ahora por las pérdidas, donde la transmitancia ahora presenta un valor de $U_c = 35 \frac{W}{m^2K}$ de la caja del calentador no siendo capaz apenas de mantener la temperatura en cuanto disminuye la radiación solar y subiendo la temperatura cuando existe fuerte radiación de una forma muy suave.

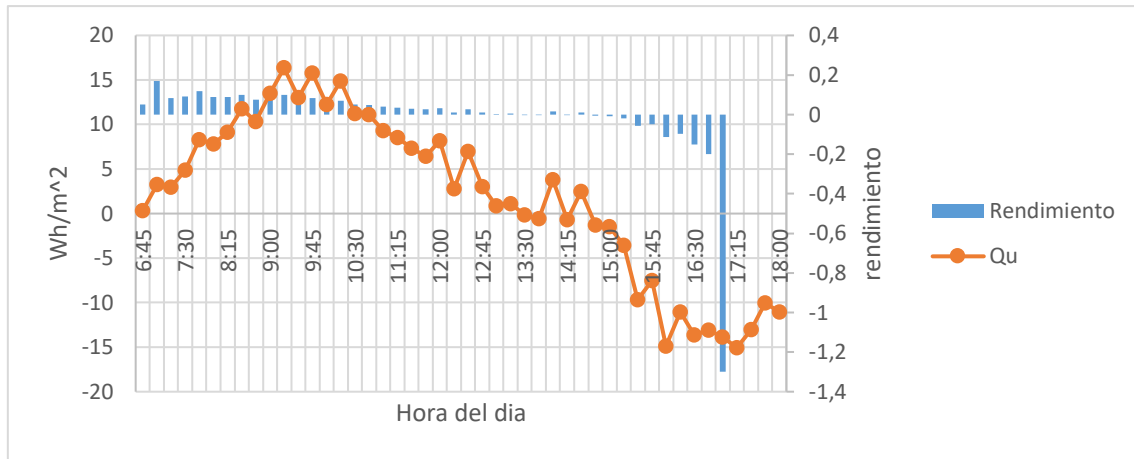


Figura 34: Calor util y rendimiento de la simulacion correspondientes al diseño instalado

Además el rendimiento y calor útil del calentador como se muestra en la *Figura 34* representan claramente este mal funcionamiento, ya que ahora el calentador depende totalmente de las condiciones del viento y temperatura exterior para su funcionamiento. En un día caluroso sin rachas de viento será la única situación en la que pueda funcionar correctamente.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se diseña el experimento a realizar para evaluar el comportamiento de la instalación, así como su posterior análisis y la validez del prototipo frente a una posible implementación, valorando para ello el marco regulador y posibles amortizaciones.

4.1 Puesta en marcha de la instalación

La puesta en marcha de la instalación se realiza en la azotea practicable de la universidad de Moa (ISMM) el 22 de noviembre, hasta el 11 de diciembre. Por complicaciones en el experimento, al no poder conseguir el material aislante idóneo y necesario para el prototipo de calentador solar compacto, los resultados obtenidos no incluyen ningún tipo de aislamiento térmico. Cuando se propuso una alternativa al aislante comercial esperado, debido a diferentes factores y la falta de medios no pudo llevarse a cabo.

También, otro punto que dificultó enormemente la obtención de los resultados fue la instrumentación disponible para la medición de las temperaturas, ya que, al ser completamente analógica, implicaba la subida a la azotea cada vez que se requería tomar una medida con lo que las medidas se distancian un poco más en el tiempo. Para homogenizar los datos recogidos en el tiempo y así realizar el análisis por tramos de 15 minutos como se realiza en las simulaciones.

Se obtienen los valores intermedios entre mediciones por medio de una interpolación de tipo spline, ya que este tipo de interpolación resulta adecuada para esta evolución de la temperatura y suavizar las curvas de los datos recogidos. Dicha interpolación usada, utiliza un polinomio de grado tres que se va adaptando a los tramos en los que se requiere interpolar.

Para la recogida de datos, a parte de los termómetros analógicos ubicados en el colector, se dispone de una cámara termográfica que servirá para corroborar la hipótesis de temperatura uniforme del absorbedor y ver donde se producen las mayores pérdidas de calor. También se utiliza una estación climatológica de la marca watchdog dogs 2000,

programada para ir recopilando datos cada 15 minutos a partir de los siguientes sensores como se puede observar en la *tabla 3*.

Tabla 3. Sensores estación meteorológica. [26]

SENSOR	RANGO DE MEDIDA	PRECISIÓN
Velocidad del viento	0-175 mph	±5%
Dirección del viento	2° de incrementos	±7°
Temperatura	-20° to 70°C -4° to 158° F	±0.6°C ±1°F
Humedad relativa	Del 20% al 100% @5° a 50° C	±3%
Precipitaciones	0.01" (0.25cm) de resolución	±2%
Radiaciones solares	1-1250 W/m2	±5%

Los datos de irradiancia se recogen mediante dicho sensor orientado e inclinado de la misma forma que el colector, para así conseguir la irradiancia que recibe directamente el panel.

4.2 Resultados experimentales

La experimentación se divide en dos fases:

Una primera fase de toma de resultados previos, con el objetivo de comprobar el buen funcionamiento de la instalación, prestando atención al buen ajuste de las conexiones hidráulicas, la correcta inclinación y orientación, así como corroborar que la evolución de la temperatura del agua de red ubicada en el tanque de almacenamiento varía según la temperatura ambiente.

En esta primera fase se toma la temperatura del colector a lo largo del día sin ninguna demanda, en primer lugar, sin ninguna cubierta transparente, para ver su influencia y además, por no disponer de ella al inicio de esta fase.

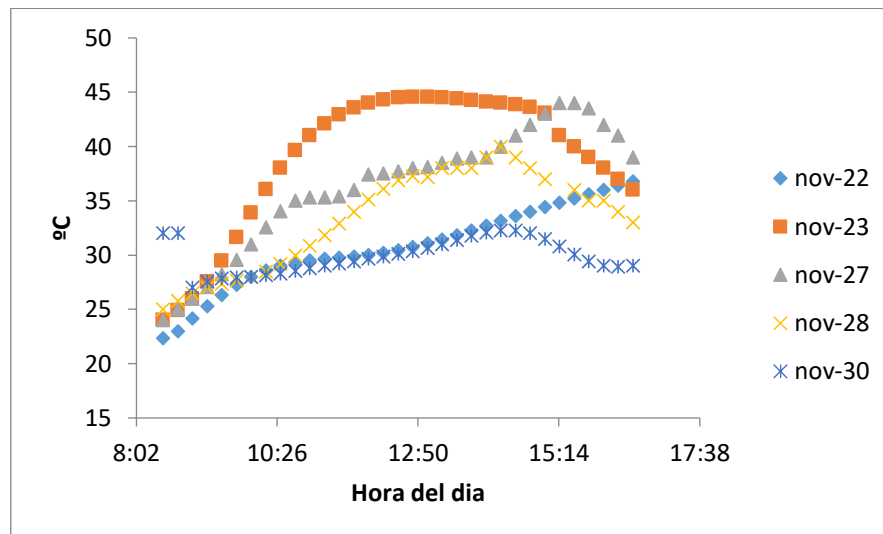


Figura 35. Temperatura del colector sin demanda de agua ni cubierta.

En la *Figura 35* se representan todos los datos recogidos de esta primera fase de experimentación, son distantes entre sí porque no fueron días homogéneos de radiación, ni de temperatura ambiente entre ellos, aun así se puede apreciar como todos los días la temperatura alcanza un valor de equilibrio máximo y se mantiene a lo largo del día al no existir ningún consumo de agua, además este valor de temperatura varía en cada día, por las diferentes condiciones climatológicas. Cuando hay dos días similares de condición atmosférica, como el 30 y el 22 de noviembre la temperatura las curvas se asemejan entre sí.

En la segunda fase de experimentación, con la cubierta instalada, se simula una demanda de ACS según la curva (*Figura 16: Gráfica de la demanda de consumo de ACS en el sector residencial de Cuba.*). Esto se realiza extrayendo agua del calentador en dos momentos puntuales del día, uno a medio día de unos 15 litros, simulando el uso de un fregadero y un volumen de 45 litros a última hora de del día solar, con un gasto

equivalente al aseo personal. Creando así el modelo de experimentación a seguir para de esta forma, poderse ver claramente el comportamiento frente a la demanda.

Como se ha comentado, al realizar un gasto y disminuirse la temperatura del colector al mediodía, estamos reduciendo las pérdidas al reducir la temperatura del calentador y pudiendo así calentar agua de nuevo hasta la temperatura en la que las perdidas térmicas vuelvan a equipararse al calor recibido por radiación.

Por lo que todos los resultados que se presentan a continuación corresponden a la segunda fase de experimentación, donde en todos los días de ensayo hay una demanda de agua con la cubierta translúcida instalada. Como se puede observar en la *Figura 36*, se representa la evolución de la temperatura de todos los días de mediciones, para las condiciones de funcionamiento a falta del aislante. En esta figura cabe suponer que claramente el funcionamiento es completamente dependiente de las condiciones climatológicas, ya que son muy dispares unas de otras mediciones, no siempre consiguiendo una temperatura mínima de servicio, de 37 °C. No consiguiendo en esos días los requisitos mínimos de funcionamiento debido a la baja irradiación o viento moderado.

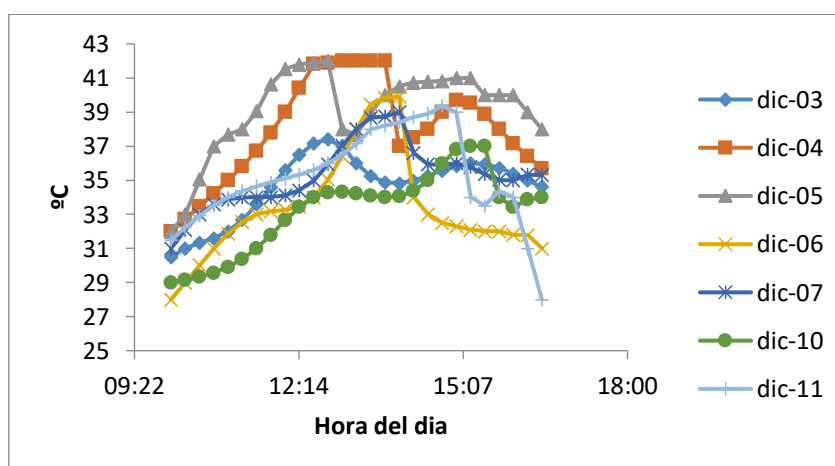


Figura 36: Temperatura del colector recogida en los ensayo, con demanda.

4.3 Análisis de resultados.

Para analizar los resultados obtenidos, se realiza el análisis en un día en el que la irradiancia se ha mantenido constante con una media de 442 W/m² y una alta irradiancia de 5128,8 Wh/m² y apenas viento en todo el día. De esta forma se consigue disminuir así

la influencia de no tener aislante y evaluar de esta forma un diseño medianamente funcional. Ya que el diseño al no tener sentido sin aislante, como se ha corroborado, por lo que el colector ha de evaluarse bajo unas condiciones en las cuales esta carencia no suponga un agravio comparativo demasiado grande.

El día en cuestión es el 5 de diciembre, 2018.

Para el primer análisis de resultado, en primer lugar se observa en la Figura 37, las condiciones climáticas mencionadas anteriormente, así como la temperatura del agua de red a lo largo del día, estos datos resultan útiles para justificar el análisis del colector.

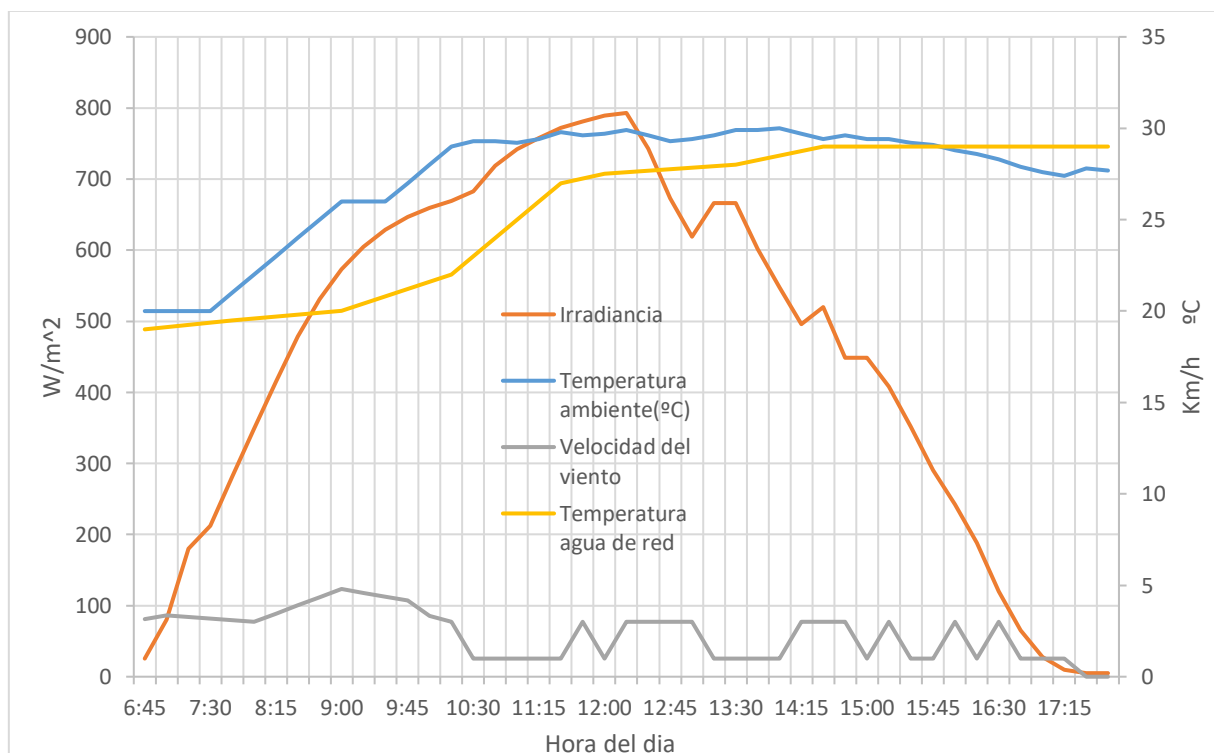


Figura 37: Condiciones climáticas del 5 de diciembre.

En la Figura 38 se observa la evolución de la temperatura, además del calor útil, en el colector en el periodo de tiempo correspondiente, mientras que el calor consumido representa la cantidad de calor que se le ha extraído por siguiendo el modelo de experimentación mencionado. Este calor consumido viene dado por el incremento de temperatura que ha tenido que realizar el panel desde la temperatura del agua de red,

situada en el tanque de almacenamiento hasta la temperatura del agua que se obtiene, al simular esa demanda.

Por esta razón se encuentran calores útiles negativos, ya que el calentador baja de temperatura en el momento que realizamos uso de él. De esta forma se contabiliza la pérdida de calor que sufre el colector.

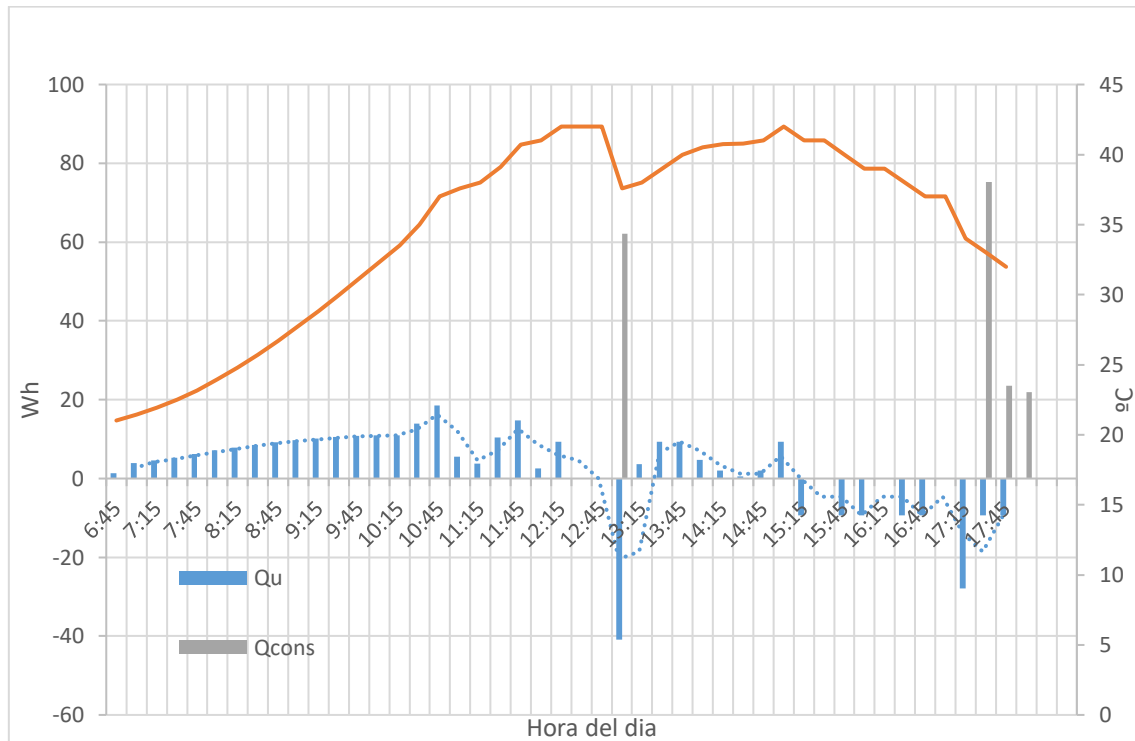


Figura 38: Evolucion de la temperatura, calor util y la representacion del calor obtenido el 5 de diembre.

Pero todo esto se ve mejor reflejado en la *Figura 39*, donde está representado el rendimiento y la temperatura del panel, aquí se puede apreciar, que al realizar un consumo de agua en el colector al medio día cuando la temperatura de agua ya ha alcanzado valores más altos, aumentando las perdidas haciendo bajar el rendimiento justo antes de solicitar la demanda, posteriormente el rendimiento volverá subir para volver a calentar agua fría, como ya se ha explicado.

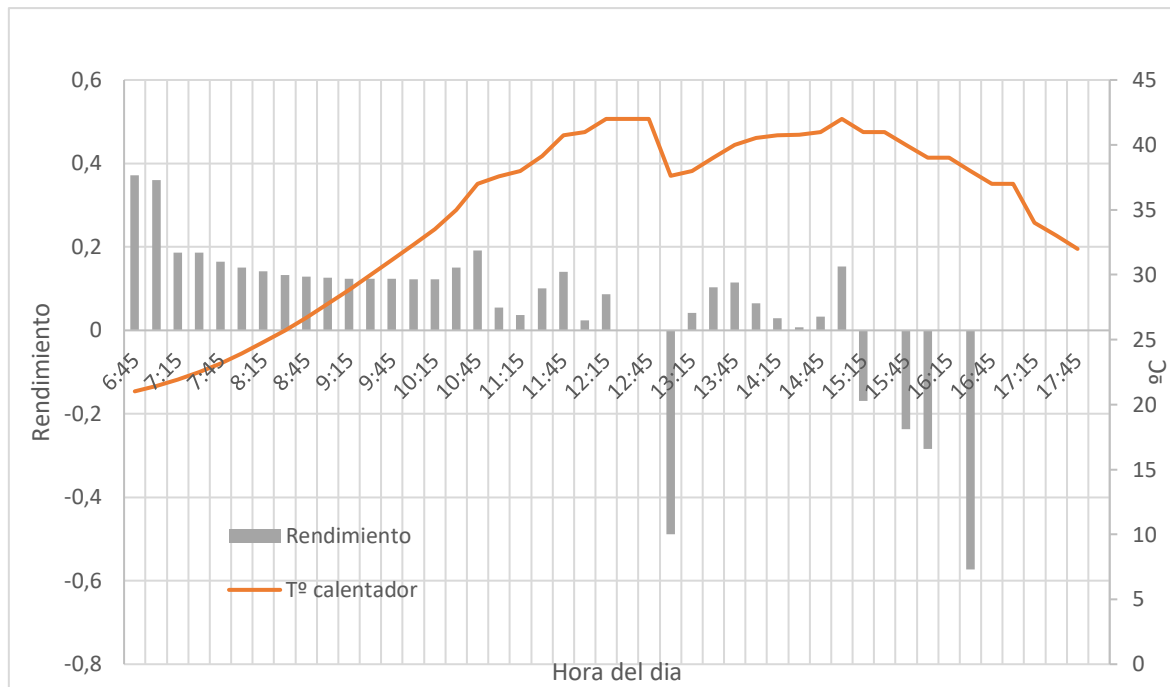


Figura 39: Rendimiento y temperatura del colector para el 5 de diciembre.

Los rendimientos negativos se deben igual que con anterioridad al calor útil negativo, a la disminución de la temperatura del panel provocada por la demanda de agua caliente.

El calor consumido no corresponde exactamente al calor útil negativo que se muestra en la *Figura 38*, ya que como también se ha mencionado este calor consumido es mayor, gracias a que la temperatura del tanque de almacenamiento y el volumen de agua en reposo de las conexiones hidráulicas, ha aumentado también gracias a la radiación, de esta manera el agua de entrada al panel ya ha sido precalentada. Como se puede observar en la *Figura 40*.

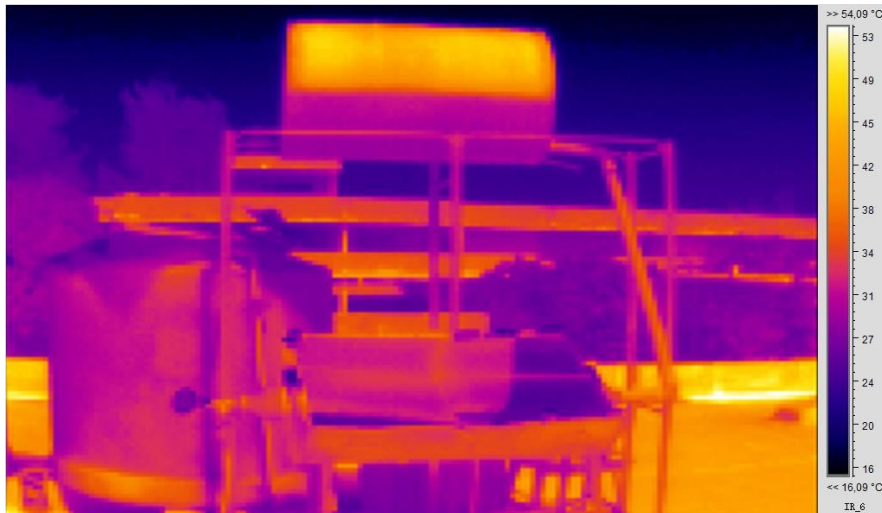


Figura 40: Imagen termográfica de la instalación al medio día solar el 5 de diciembre.

Además, también se puede observar en la figura anterior, como el fondo del calentador adquiere cierta temperatura al no disponer de aislante, con grandes pérdidas de calor en esa zona.

Con todo ello, el rendimiento global en este día en cuestión de un 10,2%, no siendo buenos resultados, en gran parte debido a la falta del aislante. Aun así, se ve claramente que en días de insolación media en Cuba, como el analizado, puede llegar a cubrir la demanda, siendo más irrelevante el rendimiento, ya que el objetivo principal del diseño es cubrir la demanda.

Es necesario resaltar que el comportamiento de este diseño sin aislante es demasiado influenciado por las condiciones del viento y temperatura ambiente. Aun así, también queda demostrado que al analizar los datos realizando un consumo de agua, podemos corroborar que este consumo en el momento adecuado eleva el rendimiento.

Por último, al disponer del modelo teórico, se realiza una comparación de los resultados obtenidos con este modelo y los recogidos experimentalmente, con las condiciones climatológicas del día en cuestión.

En la *Figura 41* se muestran las temperaturas obtenidas en el ensayo frente a las calculadas por el modelo teórico, además en este se incluyen también los consumos de agua caliente de igual manera que se realizó en el ensayo, de ahí que los resultados del

modelo se aproximen a los experimentales. Esto también demuestra que el modelo se puede considerar una buena aproximación para las estimaciones.

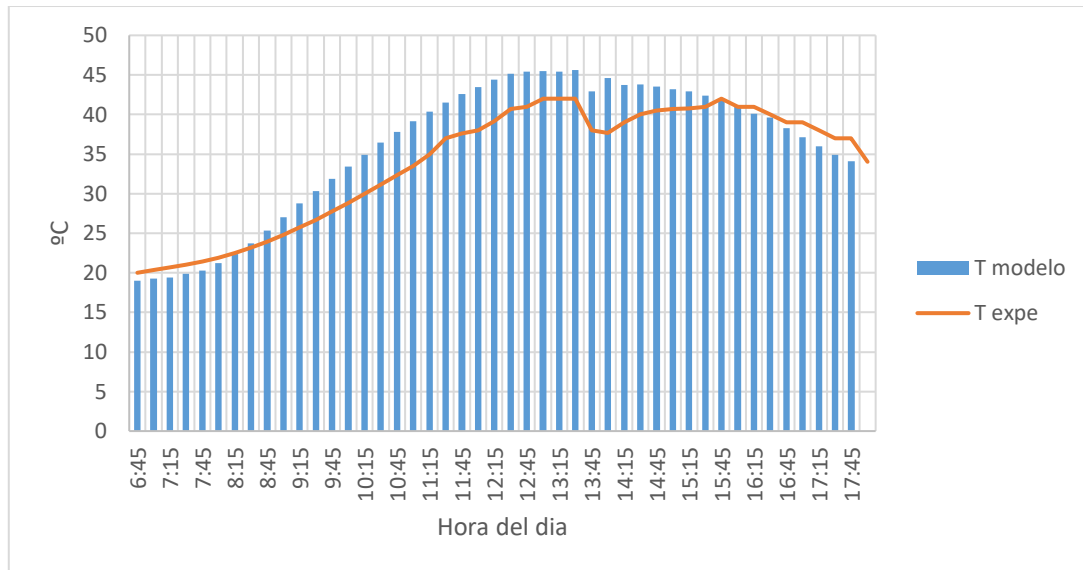


Figura 41: Comparativa de los datos obtenidos experimentalmente y los calculados por el modelo teórico bajo para el 5 de diciembre.

En este análisis de resultados es interesante también incluir una estimación de la rentabilidad y el periodo de amortización de la instalación, para ello se supone que el calentador cuenta con un aislante térmico moderado y es capaz de cubrir la demanda de una persona. Además el coste del calentador no debería sobrepasar los 30\$. El precio de la electricidad es constante en el tiempo al ser precios regulados y suponiendo la no renovación de ningún equipo y que el calentamiento del agua previamente se realizaba por efecto joule. Podemos calcular los años de amortización como:

$$AÑOS = \frac{COSTE\ DEL\ CALENTADOR}{mc_p \Delta T \eta_e \left(\frac{coste}{KWh} * \frac{1}{1000} \right) 365} = 7,15\ años$$

Donde:

m=50 Kg de agua, por persona y día.

Cp=1,16 Wh/(Kg °C)

$\Delta T = 21^\circ C$. Incremento de temperatura para conseguir la temperatura de servicio

$\eta_e = 0,9$. como rendimiento eléctrico.

$\left(\frac{coste}{KWh} \right) = 0,01 \$ / Kwh$ que se obtiene de una factura típica de 200kwh

Siendo 7 años un pedido razonable de amortización, ya que en la estimación de los datos para la obtención de la amortización ha sido bastante conservadora.

4.4 Marco regulador

Dentro del marco regulador del prototipo se encuentran dos puntos de vista, uno en el amparo cubano ya que es el país donde se desarrolla y se valora la posible implantación, donde la única norma que recoge información sobre el consumo de agua caliente sanitaria es la ya mencionada NC-176 sobre "sistema de abasto de agua en edificios sociales. Requisitos de proyectos" y no nombra nada sobre sistemas calentamiento solar para el sector residencial.

Por otro lado, según la norma europea de normalización UNE-EN-12975-2, de obligado cumplimiento en España, recoge como ha de obtenerse el rendimiento, y las curvas de normalización del colector. Detallando como realizar la obtención de los términos de la siguiente ecuación:

$$\eta_{CN} = a_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_0)}{G_T} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_0)^2}{G_T}$$

Aun así, el amparo de esta norma para el prototipo en cuestión, es mas cuestionable, ya que las condiciones de fabricación y utilización son demasiado dispares entre lo que se ha desarrollado y los objetivos que marca la norma europea.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

Este ha sido un proyecto experimental realizado en campo, durante cuatro meses en Moa, por lo que los resultados aquí presentados y la situación actual que recoge este documento son una representación de la estancia allí vivida durante los últimos cuatro meses del año 2018.

En primer lugar, hay que destacar la importancia de cubrir la necesidad del calentamiento de agua por medio de energías renovables en el sector residencial, ya que hasta ahora no existía ninguna medida por parte del gobierno cubano que recogiera estas necesidades. El futuro decreto ley 345 aún no aprobado, será quien las recoja, como se ha comentado.

Además, es destacable el problema que sufre la producción y distribución energética donde mayoritariamente se abusa de los combustibles fósiles, repercutiendo así en una incoherencia energética al calentar y cocinar con electricidad. Además de suponer un alto coste económico y ambiental para el país.

Una vez fijada la demanda requerida de ACS media de la población en dicho sector (50 litros por persona y día a 37°C), y en las condiciones que se efectúa, resulta más sencillo llevar a cabo las estimaciones oportunas para el cálculo y diseño de una posible implementación tecnológica.

Como se ha comentado, dadas estas necesidades y con el mayor número de factores posibles (ambientales, socioeconómicos, materiales y climáticos) y evaluándose todas las alternativas renovables, se concluye que la forma más adecuada de calentar agua resulta ser el calentador solar compacto.

Por lo tanto, el diseño de un colector solar compacto apropiado resulta ser una alternativa funcional para el clima tropical. Dada la alta radiación disponible, este tipo de calentador solar es el idóneo y a pesar de ser de fabricación reciclada y no presente un alto rendimiento como podrían presentar los calentadores solares comerciales, como se ha mencionado anteriormente.

Por otro lado, los materiales utilizados van a condicionar los resultados obtenidos, ya que el prototipo fabricado al no incluir el aislante, su funcionamiento es completamente dependiente de las condiciones climáticas. De este modo, solo va a funcionar correctamente en días de temperatura ambiente moderada y, sobre todo, bajas rachas de viento, puesto que es en estas condiciones, cuando el aislante no afecta al funcionamiento.

Por ello, el rendimiento global sin aislante resulta pobre, aunque no resulte muy importante a la hora de cubrir la necesidad, que es el objetivo principal. Donde esto se cumple en numerosas condiciones, gracias a ser un clima tropical.

Además, el hecho de producir un consumo a la hora adecuada en este tipo de calentador provoca un aumento del rendimiento, permitiendo calentar mayor volumen de agua a la temperatura de servicio. Esta alternativa resulta más ventajosa que la de obtener agua a mayor temperatura y enfriarla hasta la temperatura de servicio.

El hecho de que el modelo teórico realizado para simular el comportamiento del calentador tenga un funcionamiento parejo al obtenido experimentalmente, como se demuestra en la *Figura 41*, esto significa que el modelo aporta buenas aproximaciones a las del prototipo.

Por último, destacar que este trabajo puede servir para el desarrollo de más proyectos con el fin de seguir mejorando el prototipo aquí fabricado.

BIBLIOGRAFIA

- [1] M. R. S. Aguilar, "Construcción de Calentadores Solares de agua para uso doméstico a partir de Materiales Reciclados," *Evento Provincial de Cubasolar*, 2013.
- [2] S. Jose Manuel Jimenez, *Ingenios solares: Manual practico para la construccion de aparatos sencillos*.
- [3] IEA. (2016). *Statistics:Global energy data at your fingertips*.
- [4] R. M. Laurencio, "La energía eléctrica en el sector residencial en Cuba: algunas respuestas colectivas de su uso ", ed. Centro de Estudio de Energía y Tecnología Avanzada de Moa 2017.
- [5] L. B. Pérez, "Calentadores solares en viviendas," *cubasolar*, 2016.
- [6] D. Argota Pupo, "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS DEL SECTOR RESIDENCIAL EN CUBA," *Electrica*, ISMM, 2012.
- [7] A. Dartayet Muñoz. (2007). *Estudio del consumo de portadores energéticos en el sector estatal y residencial por concepto de calentamiento de agua*.
- [8] L. Domingo Laino, "Un Análisis de la Política Energética en Cuba," in *POBLACIÓN Y DESARROLLO*, ed, 2016.
- [9] ONEI, "Anuario Estadístico de Cuba: Minería y Energía. In.: Oficina Nacional de Estadísticas e Información," 2014.
- [10] I. O. Bello. (2016). *Consumo eléctrico y sector residencial cubano*.
- [11] REVE, "Energías renovables en Cuba para reducir la dependencia energética del petróleo," *Revista eólica y del vehículo eléctrico*, 2014.
- [12] ONURE, "SITUACIÓN ACTUAL DE LA EFICIENCIA Y CONSERVACIÓN ENERGÉTICA," presented at the Reunión Nacional de la Red de Eficiencia Energética del MES, Cienfuegos, 2018.
- [13] L. S. Cora Placco, Carlos Cadena, "COLECTORES SOLARES PARA AGUA CALIENTE," ed. INENCO, UNSa –CONICET.
- [14] J. P. Martínez. (2018). *Salario medio en Cuba es "inventado", no alcanza "ni para empezar"*.
- [15] R. D. Santos, "Radiación solar promedio anual en Cuba," ed.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Radiacion-solar-promedio-anual-en-Cuba_fig1_317949936.
- [16] L. B. PÉREZ and M. Á. GONZÁLEZ, *Manual calentadores solares: Cubasolar*, 2008.
- [17] P. Frausto. (2014). *CALENTADORES DE AGUA SOLARES*. Available:
<https://slideplayer.es/slide/1070434/>
- [18] L. B. Perez, "El calentador solar," *Cubasolar*.
- [19] D. A. Pupo, "ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE LAS CARGAS ELÉCTRICAS DEL SECTOR RESIDENCIAL EN CUBA," ISMM, Moa, Cuba, 2012.
- [20] M. d. i. O. N. d. N. (NC), "SISTEMA DE ABASTO DE AGUA EN EDIFICIOS SOCIALES. REQUISITOS DE PROYECTO," in *NC-176:2002*, ed, 2002.
- [21] IEA. (2018). *Statistics Global energy data at your fingertips*. Available:
<https://www.iea.org/statistics/?country=CUBA&year=2016&category=Emission&indicator=CO2EnergyMix&mode=table&dataTable=INDICATORS>
- [22] o. GmbH, "Oil drum 55 gallon," ed, 2015.
- [23] PVSystS.A., "A powerful software for your photovoltaic systems," 2018.

- [24] J. A. B. Duffie, William A., *Solar Engineering of Thermal Processes*, 2013.
- [25] S. Meteonorm 7.1, "Origen datos de radicion," ed, (2000-2009).
- [26] P. I. S.L, "Estación meteorológica WatchDog 2000," ed.